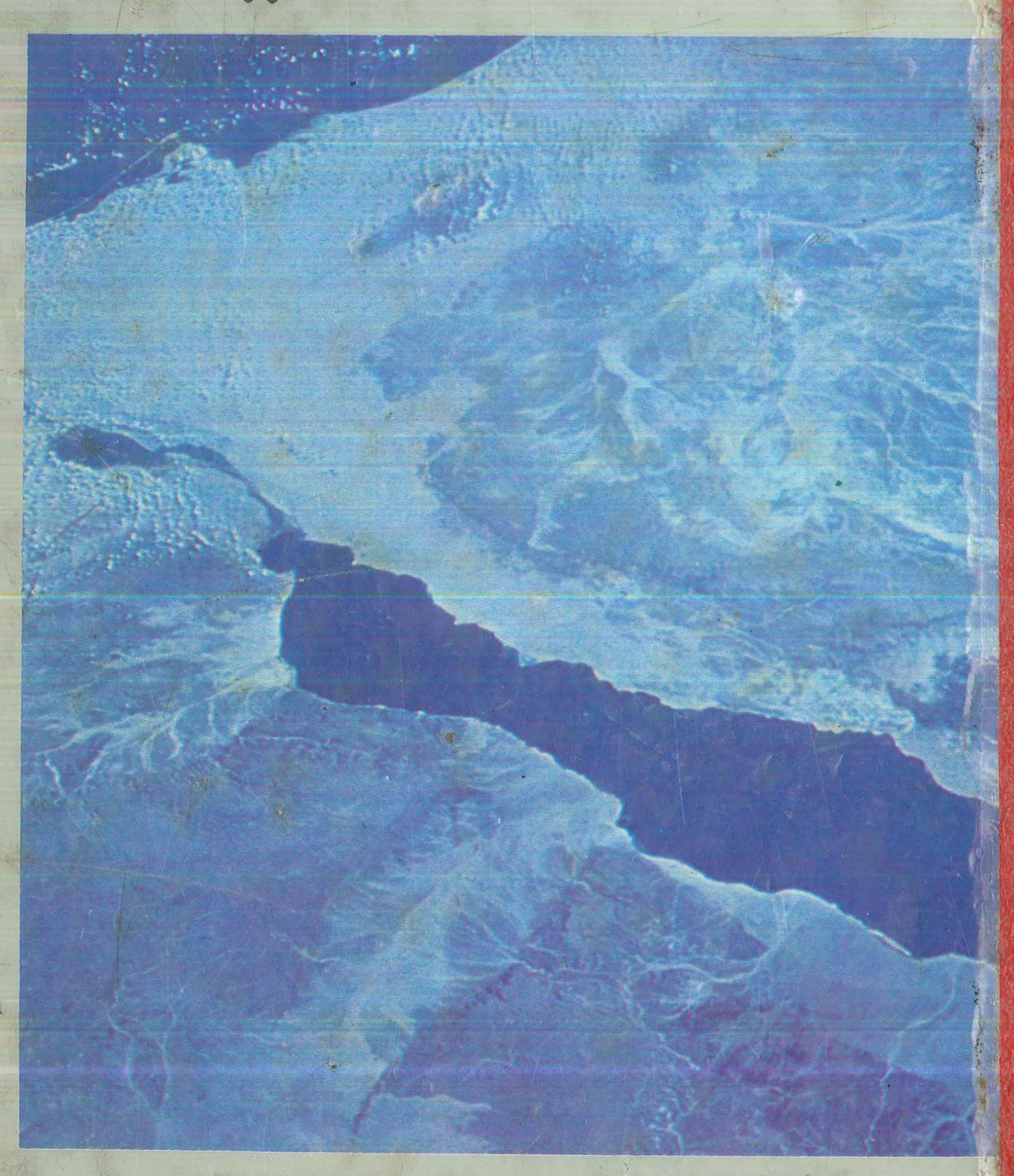
الأرض

مقدمة للجيولوجيا الطبيعية



لوتجنز

ترجمة:

د. عمر سليمان حموده

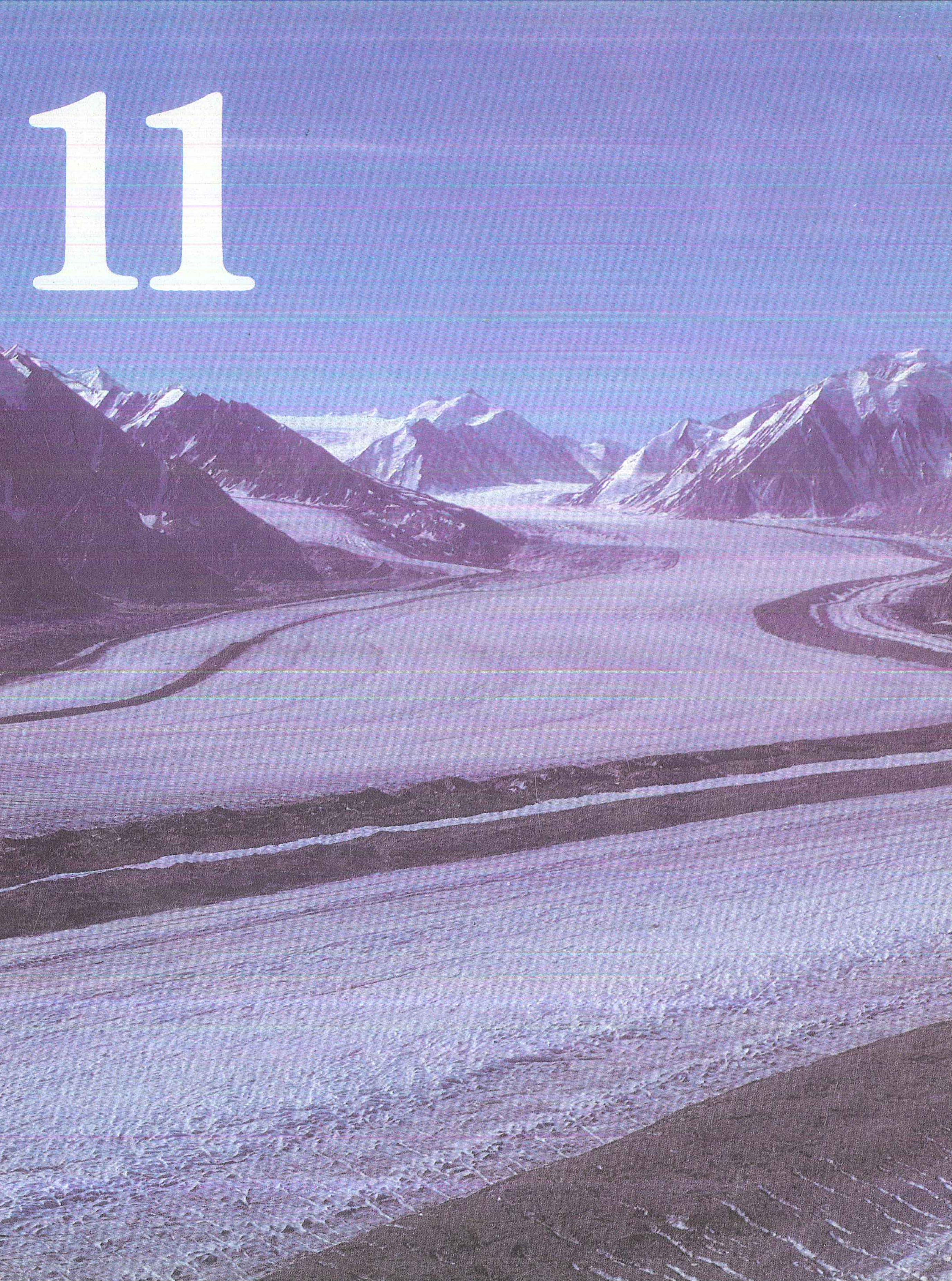
د. البهلول على اليعقوبى

د. مصطفى جمعه سالم

11



المجَالد والتجلّد


11

المجالد والدورة المائية
تكوّن جليد المجالد
حركة المجالد
- معدل حركة المجالد
- محتوى المجالد
التعرية الجليدية
الأشكال الطبوغرافية الناتجة عن التعرية الجليدية
- وديان المجالد
- النتوءات والقرون الجبلية
- صخور أصنام الأغنام
الرسوبيات الجليدية
معالم رسوبيات التّل
- مورين النهاية والمورين الأرضى
- المورين الجانبى ومورين الوسط
- التلال الجليدية البيضاوية
معالم كتل الرسوبيات الطبقية الجليدية
- سهول رسوبيات الجليد المنقول وسلاسل رسوبيات الوديان الجليدية
- رسوبيات خط التلامس مع الجليد
نظرية التجلد والزمن الجليدى
بعض المؤثرات غير المباشرة لمجالد الزمن الجليدى
أسباب التجلد

مجلدين البينيين يلتقيان ليكونا ركاما جليديا وسطيا بجبال سانت الياس بمنطقة يوكون.

المجَلدة كتلة سميكة من الجليد تتكون على سطح الأرض بتراكم ورزم واعادة تبلّر الثلج مع شواهد لحركة فى الماضى أو الحاضر. وبالرغم من ان المجالد موزعة على أماكن عديدة من العالم غير أنها عادة ما تقع فى أماكن نائية بعيدة عن التجمعات السكانية. وتوجد آلاف المجالد المحدودة المساحة فى المناطق الجبلية. وعادة ما يقتصر وجودها على الأودية وتعرف بالمجالد الألبينية (شكل 11 ـ 1). أما ما يعرف بالمجالد القارية فتختلف عن المجالد الألبينية فى حجمها حيث لا يقتصر توزيعها على الوديان الجبلية فحسب ولكنها تغطى مساحات شاسعة من سطح الأرض. ويوجد اليوم كتلتين رئيسيتين للمجالد القارية، إحداهما تغطى مناطق جرينلاند والثانية تغطى جزءاً كبيراً من منطقة القطب الجنوبى (شكل 11 ـ 2). وتبلغ مساحتاهما مجتمعتين حوالى 10 % من سطح اليابسة. والجليد فى قارة جرينلاند يغطى حوالى 80 % من مساحتها بكمية قدرها 1.6 مليون كيلومتر مكعب وبمتوسط سمك يبلغ 1500 متر. وبمقارنة جليد جرينلاند مع جليد قارة القطب الجنوبى فان كميته تبدو صغيرة للغاية.

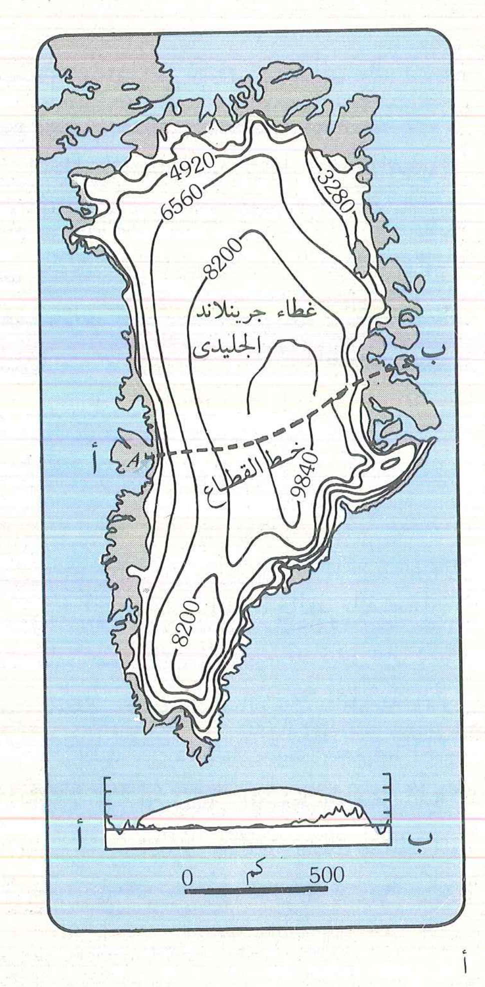
المجالد والدورة المائية

سبق وأن عرفنا أن الماء بالكرة الأرضية فى حركة مستمرة فهو ينقل المرّة تلو المرّة من المحيطات الى الغلاف الجوى ويتساقط على الأرض ثانية ليجرى فى أنهار وينساب تحت الأرض تجاه المحيطات وهكذا. غير أن جزءا من الماء المتساقط على شكل ثلوج على المرتفعات العالية أو المناطق القطبية قد يأخذ طريقه داخل الدورة المائية بتسربه الى باطن الأرض أو انسيابه فى مجارى على السطح ككتلة جليدية متحركة تعرف بالجليد. ومعلوم أن مصير الجليد الى الذوبان، ومن ثمَّ تكملة مسيرته فى اتجاه البحر. غير أن بقائه على حالته المتجمدة قد تستمر عشرات أو مئات بل آلاف السنين أحيانا. فقد أفادت بعض المعلومات التى تم تجميعها عن جليد جرينلاند بأن عمر البعض منه يصل الى 2500 سنة.

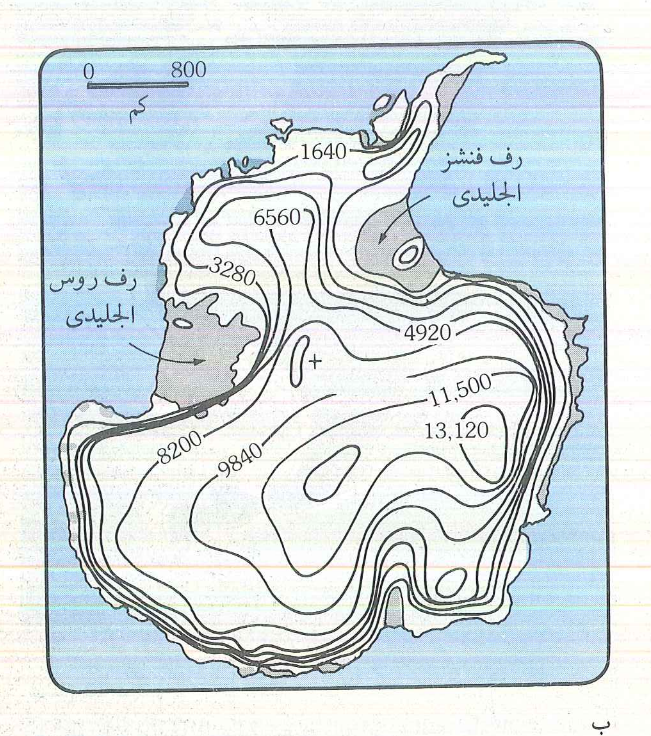


شكل 11 ـ 1

منظر جوى لمجلد جبال الكاسكيد وهو مجلد ألبينى يبلغ طوله 3 5 كيلومترا. لاحظ وضوح كل من خط الثلج والتصدعات.



أ



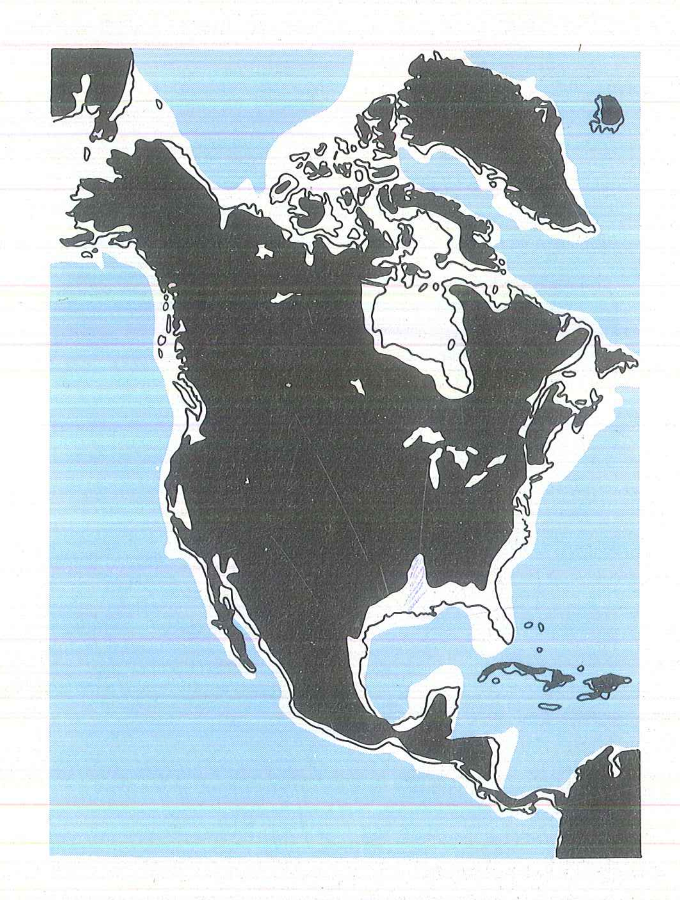
ب

شكل 11 ـ 2

الصفائح الجليدية. (أ) ـ بجرينلاند. (ب) ـ بقارة القطب الجنوبى وهما المجلدان القاريان الوحيدان الموجودان على سطح الأرض اليوم. توضح الخطوط الكنتورية عمق الجليد (بالأقدام).

وتقدر الكمية الاجمالية للمياه المخزنة كجليد بما يزيد على 2 % من مياه العالم. وقد لا يكون هذا الرقم صحيحا اذا ما أخذنا فى الاعتبار الكمية الفعلية للمياه. ويقدر حجم المجالد الألبينية مجتمعة بحوالى 210,000 كيلومتر مكعب أى ما يضاهى حجم مياه بحيرات العالم المالحة والحلوة. وبالاضافة الى ذلك فان مجلد القطب الجنوبى يمثل 80 % من جليد العالم، وما مقداره ثلثى مياه الكرة الأرضية العذبة. واذا ما ذابت كل هذه الكمية فان مياه البحار سترتفع بين 60 و 70 مترا عن منسوبها الحالى مما سيؤدى الى غمر مناطق ساحلية شاسعة آهلة بالسكان (شكل 11 ـ 3). واذا ما تمت إذابة جليد القطب الجنوبى تدريجيا فانها تكفى (1) لتغذية نهر المسيسبى على مدى 50,000 سنة، (2) نهر الأمازون لمدة 5000 سنة، (3) أنهار العالم مجتمعة لمدة 750 سنة. ويوضح المثال السابق كمية الجليد الذى يغطى مساحات شاسعة من الكرة الأرضية. ومما يذكر أن هذه الكمية تمثل فقط ثلث المجالد التى كانت موجودة فى وقت من الأوقات.

وسنتناول فى نهاية هذا الفصل تلك الفترة التى يطلق عليها بالزمن الجليدى.



شكل 11 ـ 3

خريطة قارة أمريكا الشمالية توضح الشواطىء اليوم وما كانت عليه أثناء الزمن الجليدى (1800 سنة مضت، الخط الداخلى) كما يوضح ما ستكون عليه اذا ما ذاب جليد جرينلاند والقارة القطبية الجنوبية.

تكون جليد المجالد

ولكون الثلج مادة المجالد الخام فانها من الطبيعى أن تتكون فى أماكن يزيد فيها تراكم الثلج شتاء عن كميات ذوبانه صيفا. وقبل تكوّن المجلد يتحتّم أن يتحول الثلج الى جليد. ومما يذكر أن رقائق الثلج لا تتكون من ماء متجمد بل من بلورات رقيقة تكونت عند تحول بخار الماء الى مادة صلبة تعرف فيا بعد **التسامى**. وعند بقاء درجة الحرارة تحت الصفر بعد نزول الثلج تبدأ عملية التغيرّ فى تركيبة الثلج الهشة، وذلك بتداخل الهواء بين البلورات السداسية الشكل، مما يعمل على تبخير أطرافها ثم تكثفه عند الوسط. وبهذه الطريقة تصبح رقائق الثلج أصغر حجما وأكثر كروية وسمكا مما يعمل على اختفاء الفتحات من بينها. وبدفع الهواء الى الخارج يتحول الثلج الى حبيبات ذات كثافة اكبر تسمى **الفيرن**، والتى تكوّن التراكمات الثلجية القديمة مع نهاية فصل الشتاء. وبتزايد تصاعد الثلج يزداد الضغط على الطبقات السفلية منه مما يزيد من رزم الحبيبات التى تنصهر فى كتلة صلبة عند زيادة سمك التراكم الثلجى عن 50 مترا مكونا جليد المجالد.

حركة المجالد

يشار عموما الى حركة جليد المجالد بالفيضان أو التدفق ولكونه مادة صلبة فان التسمية قد تبدو غير دقيقة. فالجليد يتدفق باحدى طريقتين أساسيتين. الطريقة الأولى تتمثل فى حركة الجليد من داخله حيث يتصرف الجليد، المادة الصلبة الهشة الى أن يصل الضغط الواقع عليه ما يعادل وزن 50 مترا من الجليد. وعندها يسلك مسلك المواد اللدنة ويبدأ فى التدفق. ومثل هذه الحركة تحدث نتيجة للتركيب الجزيئى للجليد. فجليد المجالد يتكون من طبقات من الجزيئات المرصوفة فوق بعضها. وحيث أن الوصلات بين الطبقات أضعف من نظيراتها بين الجزيئات فان الضغط يفوق ما تتحمله الوصلات بين الطبقات فتنزلق فوق بعضها البعض. أما الطريقة الأخرى لحركة الجليد، والتى لا تنقص فى أهميتها عن الطريقة الأولى هى إنزلاق كتلة كاملة من الجليد على الأرض. وباستثناء جليد بعض المناطق القطبية والذى قد يكون مجمدا وملتصقا بالطبقات الصخرية فان الأجزاء السفلى بمعظم المجالد تتحرك بهذه الطريقة، والتى تعرف **بالانزلاق القاعدى**. ويعتقد هنا أن الماء يعمل كرافعة أو ربما مزلق يساعد فى حركة الجليد على الصخور. ومصدر الماء فى هذه الحالة ذوبان جزء من الجليد حيث ان درجة ذوبانه تتناقص بزيادة الضغط. وعليه فانه داخل عمق المجلد يكون الجليد عند نقطة الذوبان بالرغم من أن درجة

الحرارة أقل من 0° م. وقد تساعد عوامل أخرى على تواجد الماء داخل أعماق المجلد مثل إرتفاع درجة الحرارة بواسطة الدفق اللدائنى (ظاهرة مماثلة لحرارة الاحتكاك) أو عن طريق الحرارة المنبعثة من باطن الأرض. وقد تستمد الحرارة من اعادة تجمد الماء المنساب، وهى ظاهرة تصاحب تغير حالة الماء من سائل الى صلب فيما يعرف بالحرارة الكامنة للاندماج.

ويوضح الشكل 11 ـ 4 تأثير هذين النوعين من الحركة الجليدية. ويبين هذا القطاع الطولى بأحد المجالد أن الجليد لا يتدفق بنفس المعدل، بل انه يشابه المياه التى تجرى بالأنهار، حيث أن الاحتكاك بقاع المجرى الصخرى يتسبب فى بطء حركة الأجزاء السفلية من الكتلة المائية.

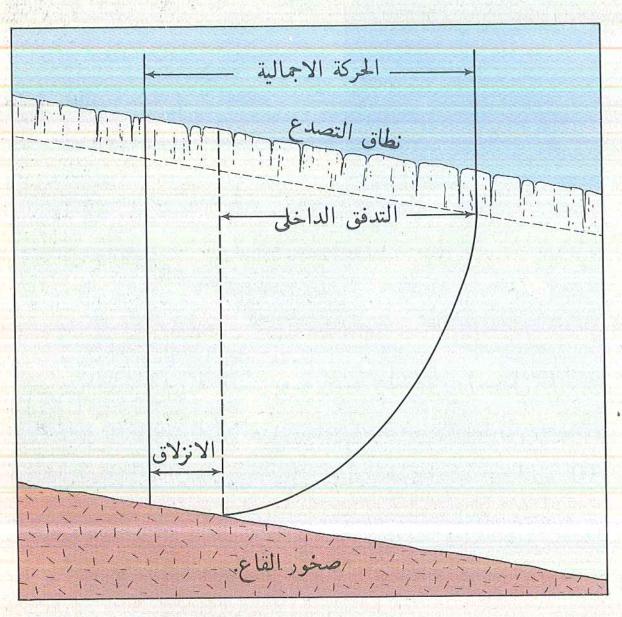
وخلافا لما هو عليه عند أجزاء المجلد السفلية، فان الخمسين مترا العليا تفتقر الى الضغط الكافى لجعلها فى حالة دفق لدائنى. وعليه فان الجليد فى هذا النطاق يكون سهل التشقق لذا يعرف **بنطاق التصدع**. وهذا النطاق يتحرك محمولا على ما تحته من الجليد. وعند حركة المجلد فوق منطقة وعرة يقع نطاق التصدع تحت قوة شد تسبب فى تكوين تشققات تعرف **بالتصدعات الجليدية** (شكل 11 ـ 5). وقد يصل عمق هذه التصدعات الى خمسين مترا مما يجعل التنقل فوق المجالد تحفه الكثير من الأخطار. وعند هذا العمق يقف حد التصدعات عند نطاق الجليد المتدفق.

معدل حركة المجالد

خلافاً لما هو معروف على حركة مياه الأنهار فإن حركة المجالد لا تلاحظ بنظرة عابرة. واذا ما تمكنا من مشاهدة مجلد متحرك بوادى جبلى فسنلاحظ أن حركته تشبه حركة مياه الأنهار، حيث أن الجليد لا يتحرك بمعدل سرعة واحدة نتيجة مقاومة قاع المجرى وجدرانه بل إن الحركة تكون أسرع عند وسط المجرى. وحيث أن الاحتكاك بصخور القاع يعمل على ابطاء حركة الجزء الأسفل من المجلد بالاضافة الى التأثير المماثل بجوانبه فإن الحركة تكون بمعدل أسرع عند المنتصف.

ويرجع تاريخ أول محاولة لقياس حركة المجالد الى أكثر من مائة سنة. ففى تلك التجربة شقت مجموعة من العصى فى خطوط مستقيمة بعرض مجلدة البينية. وبمشاهدة مواقع هذه العصى على فترات من الزمن تم التوصل الى نوع الحركة بالمجالد (شكل 11 ـ 6).

ما هى سرعة حركة المجالد؟ يعتمد معدل سرعة الحركة من مجلد الى آخر. فبعضها قد تكون حركته بطيئة جدا مما يسمح للأشجار والأعشاب أن تنمو على المخلفات الرسوبية المتراكمة على سطحه، بينما بعض المجالد يتحرك بمعدل سرعة تصل الى عدة أمتار فى اليوم الواحد. وتتميز حركة بعض المجالد بفترة حركة سريعة تتبعها فترة تقارب وسكون هذا.



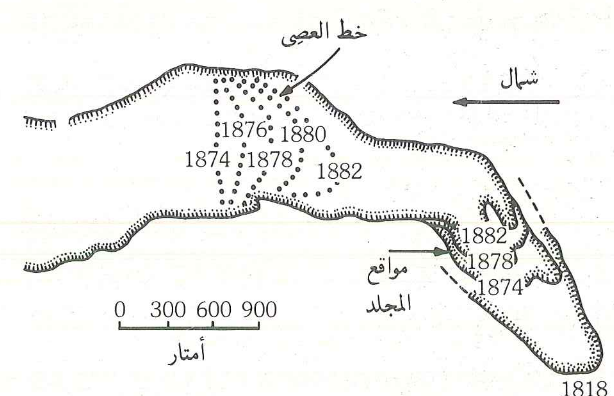
شكل 11 ـ 4

تنقسم حركة المجلدات الى قسمين. يكون الجليد تحت أعماق اكثر من 50 متر لدنا ومدفقا. وقد تنزلق كتلة الجليد الى الأمام دفعة واحدة ليحمل بنطاق التصدع فوق ما تحته. لاحظ أن معدل حركة الجليد يكون ابطأ عند قاع المجلد حيث تكون مقاومة الاحتكاك عالية.

شكل 11 ـ 5

تتكون التصدعات فى الجليد الهش بنطاق التصدع. لا تستمر هذه التصدعات الى نطاق التدفق.

وتعرف فترة الحركة السريعة هذه بالتموّر (شكل 11 ـ 7). وعلى سبيل المثال فقد تقدم مجلد حسان آباد بجبال كراكورام باقليم كشمير شمالى غرب الهند ما يقارب 10 كيلومترات فى أقل من ثلاثة أشهر أى بمعدل 130 مترا فى اليوم تقريبا. ولا يعرف سبب أو أسباب هذه الحركات المفاجئة. فقد يكون أسفل المجلد ملتصق بالقاع الصخرى للمجرى، وعند ذوبان جزء منه وبالتالى تحرره إنطلق فى حركة سريعة ومفاجئة. ويعتقد البعض أن مقدمة المجلد تعمل كسد تعيق حركته وبتزايد الضغط الناتج عن دفع الجليد من ورائها يندفع المجلد فى حركة مفاجئة.



شكل 11 ـ 6

خريطة لمجلد الرون بسويسرا. يتحرك الجليد ببطء على جانبى المجلد. لاحظ انه بالرغم من تراجع المجلد الا ان الجليد بداخل المجلد يتقدم الى الأمام.



أ



ب

شكل 11 ـ 7

تدفق مجلد فاريجيتد الالبينى بآلاسكا. صورتين جويتين تفصل بينهما سنة (أ) ـ 29 هانيبال (أغسطس) 1964 و (ب) ـ 22 هانيبال (أغسطس) 1965 . يكون حجم المجلد بين 20 الى 50 ضعفا أثناء التدفق مقارنة بمرحلة الهدوء.

العملية يتسرب الماء بالشقوق ومن بعد يتجمد مرة أخرى ويتمدد مسببا بتمدده فى خلع أجزاء من الصخور يتراوح حجمها من حبات الدقيق الى حجم المنازل.

والطريقة الثانية لتعرية الجليد هى **الكشط** وأثناءها يقوم الجليد وحمولته الصخرية المتحركة ببرد الطبقة الصخرية بقاع مجراه، وكذلك الصخور المنقولة بداخله. وقد يكون من المناسب تسمية نتاج ذلك **بدقيق الصخر.** وخير دليل على قدرة الجليد على انتاج الدقيق الصخرى لون الماء الضارب الى الرمادى اللون والماء المغادر للمجالد عند ذوبان جزء منها. وعندما يحمل المجلد أجزاء صخرية كبيرة تحدث خدوش أو أخاديد بقاع مجراه تسمى **بالحزات الجليدية** (شكل 11 ـ 9). وهى تبين اتجاه حركة المجالد. وغالبا ما يمكننا التعرف على التصريف الجليدى بمنطقة واسعة عن طريق رسم خرائط لاتجاهات الحز الجليدى. ومما يذكر أنه فى حالة ما تكون أغلب حمولة المجلد من الغرين لا تتكون خطوط حز على سطح مجراه ولكنه يكون مصقولا.

ويختلف تأثير المجالد القارية عن المجالد الألبينية. فالزائر لمناطق المجالد الألبينية يشاهد طبوغرافية تتميز بأطراف مدببة ذات زوايا. والسبب فى ذلك أن المجالد



شكل 11 ـ 9

كشط الجليد. خطوط كشط الجليد على صخور القاعدة بولاية ماسيتشوستس الامريكية.

الألبينية المتحركة فى وديان تعمل على زيادة شكلها المزوّى، باستحداث جدران وديان شديدة الانحدار والعمل على ثلم تلالها. وبالعكس من ذلك فان المجالد القارية تعمل على تغطية المنطقة وبالتالى تشذيب الرؤوس البارزة التى تصادفها.

وفى الختام يجب التنويه الى أن مثل ما هو عليه الحال فى سبل التعرية الأخرى فإن معدل التعرية الجليدية يتباين بشكل كبير حيث أن مدى تأثيره يرجع الى أربعة عوامل: (1) معدل حركة المجلد و (2) سمك الجليد و (3) شكل ووفرة وصلادة محتوى قاعدة المجلد من الفتات الصخرى و (4) مدى قابلية سطح المجلد للتعرية. وباختلاف هذه العوامل من وقت الى آخر ومن مكان الى آخر ينجم عنه التباين فى معالم **مناطق التجلد ومدى تأثرها.**

الأشكال الطبوغرافية الناتجة عن التعرية الجليدية

بالرغم من أن للمجالد القارية قدرة رهيبة على التعرية الا أن التضاريس الناتجة عن هذه الكتل الجليدية الضخمة لا تعطى ما يمكن أن تقدمه المجالد الألبينية من مناظر خلابة. وتميز المناطق المتأثرة بصفائح الجليد القارية بسطح مستوٍ ومصقول. وعلى العكس من ذلك فإن المجالد الألبينية تعمل على إبراز وتعميق الأخاديد الجبلية بمناطق تواجدها.

وديان المجالد

يكشف التجوال فى الوديان الجليدية عن الكثير من الظواهر الناتجة عن الجليد. فالجليد لا يقوم بحفر مجراه بل يسلك مسارات المجارى المائية. وفى المرحلة السابقة للمجالد الألبينية تكون الوديان على شكل V حيث أن مجاريها فوق المستوى القاعى، وعليه تقوم بالقطع رأسيا. ولكن الوديان التى تمر بها المجالد لا تبقى على هذا الشكل، حيث أن الجليد يحور فى شكلها بالتوسيع والتعميق الى **غور جليدى** على شكل حرف U اللاتينى (شكل 11 ـ 10).

وبالاضافة الى التوسيع والتعميق يقوم الجليد بتقويم اتجاه الوادى. فبتدفق الجليد بمحاذاة المنحنيات الحادة تعمل قوة اندفاعه على إزاحة النتوءات البارزة داخل المجرى مما ينتج عنه أجرف مثلثة الشكل تسمى **النتوءات المبتورة**.

وحيث أن قدرة التعرية للمجلد تعتمد على سمك الجليد به، فإن مجارى المجالد الرئيسية يتم تعميقها الى مستويات أقل من روافدها. وعليه بعد انحسار الجليد تبقى الروافد على مستوى أعلى من المجرى الرئيسى وتسمى **الوديان المعلقة**، وهذه عادة ما تكون مواقع شلالات فيا بعد كشلالات يوسيميتى بكاليفورنيا (شكل 11 ـ 11).

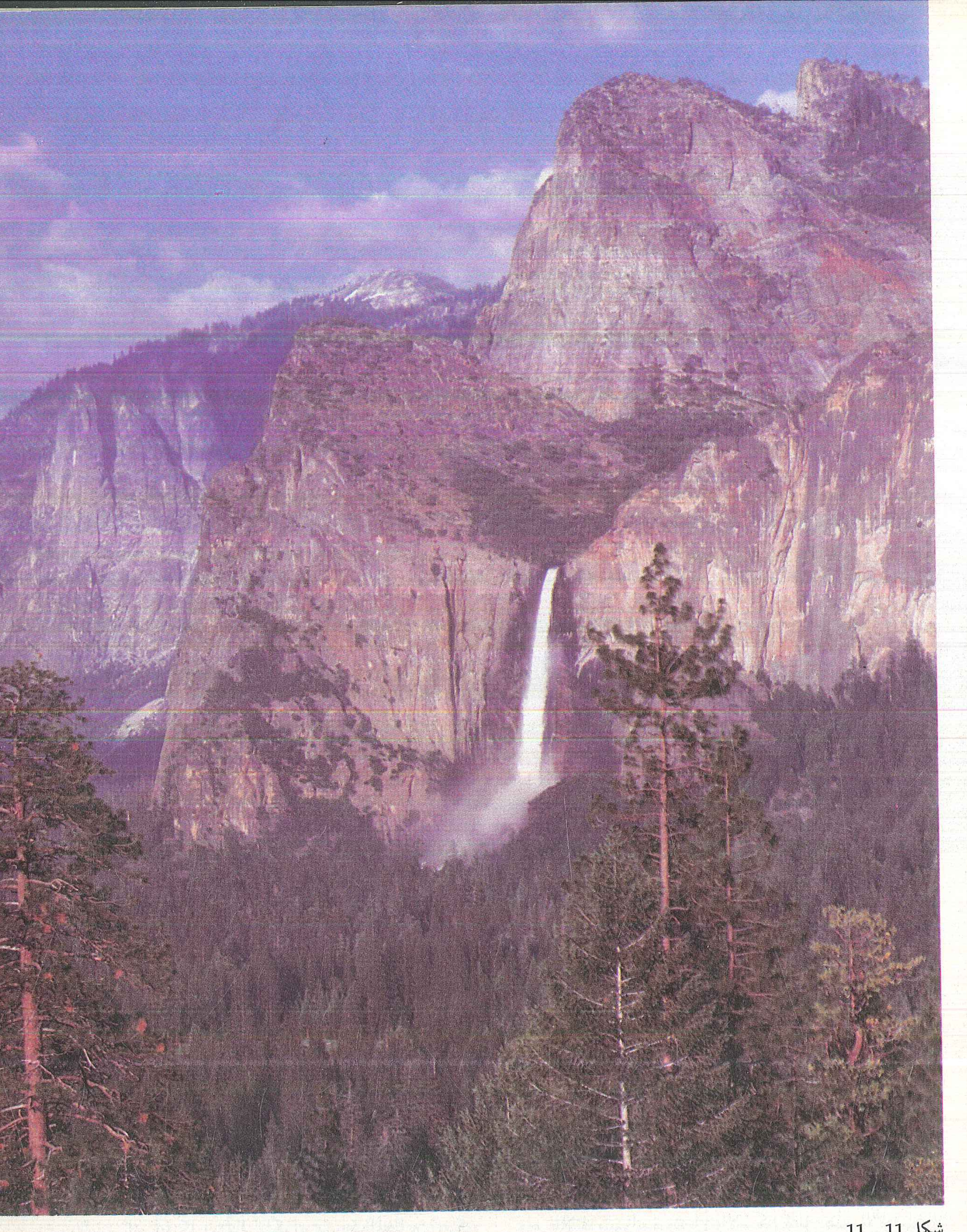
وقد ينتج عن حركة المجالد إقتلاع قطع صخرية من قاع المجرى لترك حفرٍ تعرف عند امتلائها بالماء **بالبحيرات الخرزية**، حيث أنها تشبه خرزات العقد عند النظر اليها من علٍ أو على خريطة.

وبالقرب من بداية الوديان الجليدية تتكون **المدرجات الجليدية** وهى كما يبين الشكل 11ـ12 انخفاضات لها جوانب شديدة الانحدار مفتوحة من أحد جوانبها على الوادى. ويمثل المدرج البؤرة للمصدر الجليدى، أى منطقة تراكم الثلوج وتكون الجليد. وبالرغم من أن أصل المدرجات الجليدية غير كامل الوضوح، فيعتقد أنها جوانب جبلية وعرة



شكل 11 ـ 10

قبل التجلد يكون الوادى الجبلى على شكل حرف V اللاتينى. أثناء التجلّد يعمل الجليد على توسيع وتعميق واستقامة المجرى ليحوله الى شكل حرف U .



شكل 11 ـ 11

شلالات بريدافيل بحديقة يوسوميتى تتساقط من وادٍ معلق الى منخفض جليدى.



شكل 11 ـ 12
منخفضات عند أعالى أودية جليدية تسمى المدرجات الجليدية.

أو غير مستوية تم توسيعها بفعل الجليد المندفع تحت المجلد وعلى جانبيه. وعند ذوبان المجلد عادة ما تكون هذه المدرجات مواقع بحيرات صغيرة تعرف **بالبرك الجبلية** (شكل 11 ـ 13).

وعند تواجد مجلدين على جانبين متقابلين من قاسم جبلى يتم هدم الفاصل بين المدرجات الجليدية على الجانبين عن طريق اتساع كل منهما ليتكون ممر بين المجريين يعرف **بمضيق الجليد الجبلى**. ومثال ذلك مضيق جوتهارد بجبال الألب السويسرية ومضيق تيوجا بولاية نيفادا الأمريكية ومضيق بيرتاود بجبال الروكى.

وقبل انهاء الحديث عن الوديان الجليدية يجب التنويه الى ما يعرف **بالأزقة البحرية**. وهى مداخل للبحر شديدة الانحدار توجد فى مناطق كثيرة من العالم عند ملاصقة الجبال للمحيطات (شكل 11 ـ 14) مثال النرويج وكولومبيا وجرينلاند ونيوزلندة وشيلى والآسكا. وتمثل هذه الأزقة أغواراً جليدية شبه مغمورة بعد انحسار الجليد عنها وارتفاع



شكل 11 ـ 13

بركة جبلية بمدرج جليدى.

مستوى سطح البحر لتغطية جزء منها. ويصل عمقها فى بعض الأحيان بين 1000 و 1500 مترٍ، مع ملاحظة أن ارتفاع مستوى سطح البحر ليس بتلك الأهمية فى رفع قيمة عمق الأزقة البحرية الى هذا المقدار. ففى حالة الأنهار يعمل مستوى سطح البحر على الحد من قدرتها على تعميق مجراها. ولكن الحالة تختلف مع المجالد فهى قادرة على الاستمرار فى تعميق مجراها بعد ملاقاة مستوى سطح البحر. فمثلا مجلد البينى سمكه 300 متر قادر على تعميق قاعدة مجراه 250 مترا تحت مستوى سطح البحر وذلك قبل توقف قدرته على التعرية، وقبل أن يتحول الى كتل جليدية طافية على سطح البحر.

النتوءات والقرون الجبلية

لم تقتصر طبوغرافية المجالد الألبينية بجبال الألب والروكى الشمالية وغيرها على الأغوار والمدرجات الجليدية، بل تركت بالاضافة الى ذلك تلالاً متعرجة ومدببة تسمى



شكل 11 ـ 14

الأزقة البحرية منخفضات جليدية عرتها المياه. كانت هذه المنخفضات المغمورة اليوم مملوءة بالجليد أثناء البليستوسين. خليج آلاسكا الجليدى.

النتوءات الجبلية، وأخرى هرمية ومدببة تسمى **القرون الجبلية**. ويمكن أن تتكون النتوءات والقرون الجبلية عن طريق توسيع المدرجات الجبلية، مجموعة من هذه المدرجات حول قمة واحدة لأحد التلال يمكن أن تكون قرنا جبليا، وأحسن مثال لذلك قرن الماتر بالجزء السويسرى من جبال الألب (شكل 11 ـ 15).

وقد تتكون النتوءات الجبلية بنفس هذه الطريقة، غير أن المدرجات الجبلية لا تكون عادة فى وضع دائرى حول قمة واحدة ولكنها تكون مصطفة على جانبى قاسم جبلى. وكلما كبرت المدرجات واتسعت أصبحت حافة الجبل حادة. وقد تتكون النتوءات بطريقة أخرى وهى تواجد مَجْلدين بواديين متوازيين، وذلك نتيجة ضيق المسافة بينهما بفعل



شكل 11 ـ 15

جبل الماترهورن. قمة شكلتها التعرية الجليدية بجبال الألب السويسرية.

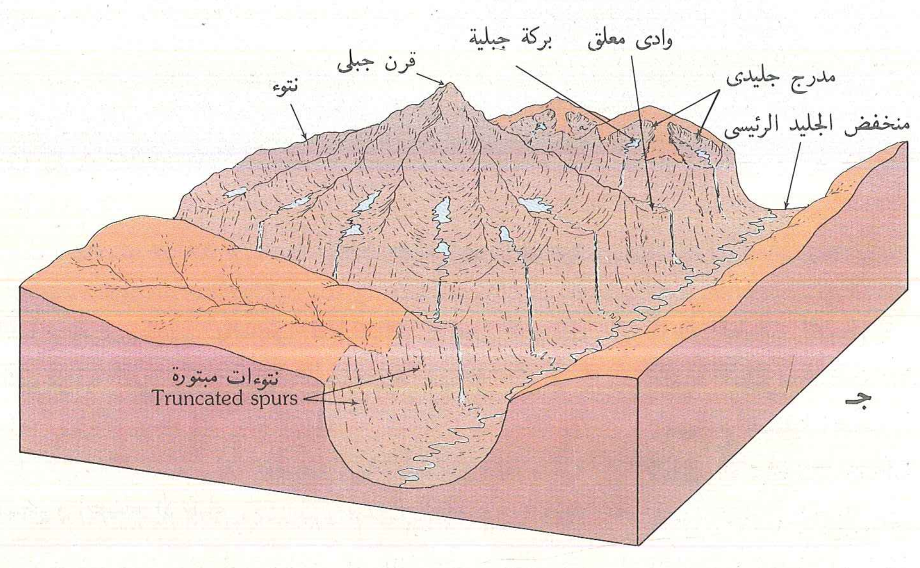
اتساع مجرى كِلَيْهِماَ. والشكل 11 ـ 16 يختصر الأشكال الطبوغرافية التى يمكن تكوّنها بالمجالد .

صخور أصنام الأغنام

فى كثير من المناطق المتأثرة بالمجالد القارية يعمل الجليد على نحت بعض المرتفعات الانسيابية عن طريق كشط الهضاب الصخرية البارزة. وتسمى هذه الهضاب العديمة التماثل، صخور أصنام الأغنام ، « المقصود بهذا المصطلح مجموعة الصخور التى شكلتها المجالد، بحيث تبدو للناظر وكأنها أغنام مضطجعة » ويعمل هنا كشط الجليد على صقل الجانب الأقل انحدارا والمواجه لحركة الصفائح الجليدية ثم هدم نهاية الطرف العلوى مما يزيد من شدة ميل الجانب الآخر (شكل 11 ـ 16). وتستعمل هذه المرتفعات

أ

ب



جـ

شكل 11 ـ 16

ظواهر تكونت بفعل مجلد ألبينى. (أ) ـ كتلة جبلية غير متأثرة بالجليد. (ب) ـ كتلة جبلية أثناء تجلّدها. (جـ) ـ الكتلة الجبلية بعد ذوبان الجليد مباشرة.



شكل 11 ـ 17

مرتفعات أصنام الأغنام بكندا. تم كشط جهة المنحدر الطفيف وقضم جهة المنحدر الشديد الميال. تحرك الجليد من الشرق الى الغرب.

عند تواجدها لاستنتاج تجاه الدفق الجليدى حيث يشير الجانب الأقل ميلا الى اتجاه تقدم الجليد.

الرسوبيات الجليدية

تستطيع المجالد نحت ونقل كميات هائلة من الرسوبيات التى يتحتم عليها ترسيبها عند ذوبان الجليد ومن ثمَّ تساهم هذه الرسوبيات فى رسم سمات تلك المناطق الطبوغرافية. وعموما فان النتائج النهائية لرسوبيات المجالد هى الانقاص من تضاريس تلك المناطق العاملة بها وتسوية طبوغرافيتها. فكثير من المناطق الريفية مثال المراعى الجبلية بنيو انجلاند وحقول القمح بداكوتا والأراضى الزراعية بغرب وسط امريكا الشمالية هى نتاج مباشر للرسوبيات الجليدية.

وقبل اقتراح نظرية امتداد العصر الجليدى كان يعتقد أن أصل الكثير من مكونات التربة والحطام الصخرى، الذى يغطى مساحات شاسعة من أوروبا، كان قد نقل من مواقع أخرى غير المتواجد بها. وفى وقت لاحق ساد الاعتقاد بأن هذه الرسوبيات انجرفت الى مكانها الحالى بفعل الجليد الطافى. وعليه ساد استعمال كلمة المنجرفة كتمييز لهذا النوع عن باقى الرسوبيات. وبالرغم من الوصول الى التفسير الحقيقى لأصل هذه الرسوبيات الجليدية فان هذه التسمية بقيت مستعملة فى مصطلحات الدراسات الجليدية. وهى تستعمل اليوم للاشارة الى كل الرسوبيات الجليدية الأصل بغض النظر الى طريقة أو مكان أو شكل تجمعها.

ومما يميز الرسوبيات المنجرفة من تلك التى تراكمت بواسطة عوامل التعرية الأخرى هو أن التراكمات الجليدية تتكون أساسا من حطام صخرى ناتج عن التجوية الميكانيكية ولم يتأثر بالتجوية الكيميائية. وعليه فان هذه الرسوبيات تحوى الكثير من المعادن القابلة للتحلل الكيميائى مثال الهورنبلند والبلاجوكليز.

والرسوبيات الجليدية نوعان: (1) التى يتم ترسبها مباشرة من المجالد وتعرف بالتِّل. (2) **مواد تترسب من الماء الدائب من المجالد وتسمى المنجرفات الطبقية** .

معالم رسوبيات التِّل

يتراكم التِّل بذوبان الجليد وترسب حمولته من حطام الصخور. وتميز رسوبيات التل من رسوبيات المياه الجارية والرياح بعدم فرز محتواها. أى أنها خليط من الأحجام المختلفة (شكل 11 ـ 18). وبتفحص هذه الرسوبيات بدقة يمكن ملاحظة صقل وتحزز محتوياتها مما يساعد على تمييزها عن باقى أنواع الصخور عديمة الفرز مثال فتات الدفق الطينى وصخور الانهيالات.

وعند احتواء التِّل على أحجام جلمودية أو تواجد الجلمود متناثرا على سطح الأرض تسمى الرسوبيات بالشاردة للدلالة على مصدرها الخارجى. وبدراسة الرسوبيات الشاردة بالاضافة الى الخصائص المعدنية لباقى محتويات التِّل، قد يستطيع الجيولوجيون التعرف على مسار المجلد المرسب لها. فمثلا وفى أجزاء من منطقة نيو انجلاند وغيرها من المناطق الأخرى تلاحظ الرسوبيات الشاردة متناثرة بالمراعى والحقول. وقد تستعمل أحيانا كحواجز لتحديد الأراضى (شكل 11 ـ 19). وتسبب الرسوبيات الشاردة متاعب فى إزالتها حيث أن فصل الشتاء من كل سنة يبرز على سطح الأرض كمية جديدة منها.



شكل 11 ـ 18
رسوبيات التِّل الجليدية. خليط من الرسوبيات عديمة الفرز.

مورين النهاية والمورين الأرضى

يعتبر المورين اكثر التكوينات الجليدية انتشارا. وقد استعملت أصلا هذه التسمية عند الفلاحين الفرنسيين للاشارة الى الهضاب الواقعة عند حواف المجلدات بجبال الألب الفرنسية. غير أن هذه التسمية اليوم ذات معنى أعم يشمل كل المعالم المتكونة من التِّل .

ويتكون ما يعرف بمورين النهاية عند طرف كل من المجالد القارية والألبينية، وذلك عند تعادل الاستئصال وتراكم الجليد. أى أن مورين النهاية يتجمع عندما يصل معدل الذوبان والبخر الى معدل تقدم المجلد. وبالرغم من أن نهاية المجلد تتوقف عن التقدم فان الجليد يستمر فى التدفق ممثلا مصدراً مستمراً للرسوبيات. وبذوبان الجليد يتراكم التِّل



شكل 11 ـ 19
رسوبيات الجليد الشاردة تم تنظيفها من المنطقة حيث استعملت علامات حدود لأحد الحقول.

وينمو مورين النهاية. وعليه كلما طالت مدة توقف المجلد عن الحركة كلما زاد حجم مرتفعات المورين.

وعندما يزيد معدل الاستئصال عن كمية الجليد المضافة تبدأ مقدمة المجلد فى التراجع غير أن عملية نقل التِّل تستمر فى تجميع كميات جديدة منه عند المقدمة. وبذوبان الجليد يترسب التِّل فى سهول متعرجة تعرف **بالمورين الأرضى**. ويعمل المورين الأرضى على تسوية معالم المنطقة بملء الحفر والجداول مما يؤدى فى أغلب الأحيان الى تغيير قنوات الصرف. وعند حداثة تراكم التِّل يسوء تصريف المياه وتنتشر المستنقعات كما هو الحال عليه فى منطقة البحيرات الكبرى.

ومن وقت الى آخر يتراجع المجلد الى حيث يتعادل الاستئصال والاضافة مرة أخرى وبهذا تستقر مقدمته حيث يتكون مورين النهاية مرة أخرى.

ويتبادل ترسب مورين النهاية والمورين الأرضى عدة مرات قبل اختفاء المجلد . وهنا يمثل مورين النهاية الخارجى أقصى حدود انتشار المجلد ويسمى كذلك هذا المورين **بالمورين الطرفى**. وتسمى مورينات النهاية المتكونة عند استقرار مقدمة الجليد المتراجعة **بمورين الانحسار**. ويلاحظ هنا أن كلاً من المورين الطرفى ومورين الانحسار متشابهان حيث يختلفان فقط فى موقعهما.

ومن أمثلة رسوبيات مورين آخر الأزمنة الجليدية ما يوجد بمناطق الوسط الغربى والشمال الشرقى لأمريكا. ففى ولاية وسكنسون مثال نموذجى لرسوبيات المورين المعطاة لمنطقة هضاب وغابات واسعة، كما أن الرسوبيات الجليدية لجزيرة اللونج شمال شرقى مدينة نيويورك هى جزء من مورين النهاية يمتد من شرقى ولاية بنسلفانيا الى رأس كود بولاية ماساتشوستس . وقد ترسب مورين الطرف بهذه الجزيرة بواسطة مجلد قارى فى مياه ضحلة نسبياً مقابل الشاطىء ومرتفع بضعة أمتار فوق مستوى سطح البحر. وحيث أن الجزء الواقع بين الجزيرة واليابسة لم يبلغ ارتفاعه مستوى رسوبيات الجزيرة، فقد غمرته مياه البحر بعد انتهاء الزمن الجليدى.

المورين الجانبى ومورين الوسط

ينتج عن المجلدات الألبينية نوعان من رسوبيات المورين التى تتواجد بالوديان الجبلية. ويعرف النوع الأول **بالمورين الجانبى** (شكل 11 ـ 20). وكما شرحنا أعلاه أن المجلد يقوم بتعرية جوانب مجراه بفاعلية خلال تحركه. وبالاضافة الى ذلك فان كميات كبيرة من الفتات الصخرى تضاف الى سطح المجلد بسقوطها من الأجزاء المرتفعة لجانبى المجرى، ومن ثم تنتقل الى حافة الجليد المتحرك. وعند ذوبان الجليد يتم ترسيب هذا الفتات الصخرى أو المورين الجانبى بالقرب من جانبى المجرى فى مرتفع من التِّل موازى للمجرى. والنوع الآخر من مورين المجالد الألبينية يسمى **مورين الوسط** (أنظر الصورة فى مقدمة هذا الفصل). ويتكون مورين الوسط عند التحام إثنان من المجالد الألبينية. وبالتقاء التِّل المنقول على جانبى المجلدين يتكون شريط أسود اللون من الفتات الصخرى داخل المجرى الجديد. ويدل هذا الشريط من الحطام الصخرى داخل مسار المجلد على حركة المجالد حيث أنه يستحيل تكونه فى غياب حركة تدفق المجلد. وكثيرا ما يلاحظ العديد من مورينات الوسط داخل مجلد ألبينى واحد، حيث أن شريطاً جديداً من مورين الوسط يتكون عند التحام أحد روافد المجلد بالمجرى الرئيسى.

التلال الجليدية البيضاوية

ولا تقتصر مظاهر الرسوبيات الجليدية على المورين. فبعض المناطق التى سبق تغطيتها بصفائح الجليد القارية تتميز بتلال ملساء طويلة ومتوازية تسمى **بالتلال الجليدية البيضاوية** (شكل 11 ـ 21). وأشهر مواقع التلال الجليدية تقع بالقرب من مدينة بوسطن الأمريكية فيما يعرف بتل البنكر. وبتفحص هذه التلال الجليدية يتضح أنها تلال انسيابية من رسوبيات التِّل عديمة التماثل، يتراوح ارتفاعها



شكل 11 ـ 20

مورين الجوانب تم ترسبه بواسطة مجلد أتاباسكا المنحسر بجبال الروكى الكندية.

شكل 11 ـ 21

تلال جليدية بولاية نيويورك. ظاهرة رسوبية تصحب المجالد القارية.

بين 15 و 50 مترا وقد يصل طولها الى الكيلومتر. ويواجه الجانب الأكثر انحدارا جهة قدوم الجليد بينما يشير الجانب الأطول والأقل انحدارا الى اتجاه حركة الجليد. ولا توجد التلال الجليدية البيضاوية منفردة بل فى مجموعات تسمى حقول التلال الجليدية البيضاوية (شكل 11 ـ 22). وعلى سبيل المثال أحد هذه الحقول شرقى روشستر بولاية نيويورك يحوى ما يقارب 10,000 تل جليدى. ولا يعرف أصل تكوّن هذه التلال غير أن شكلها الانسيابى يدل على أنها تكونت فى قوالب نطاق التدفق داخل مجلد نشط. ويعتقد أن الكثير من هذه التلال قد تكون بتقدم الجليد فوق رسوبيات سابقة ومن ثم أعيد تشكيلها.

معالم كتل الرسوبيات الطبقية الجليدية

كما تدل تسميتها فان كتل الرسوبيات الطبقية تم فرزها حسب وزن وحجم محتوياتها من الحطام الصخرى. وحيث أن الجليد غير قادر على الفرز فإن هذه الرسوبيات لم يتم تراكمها مباشرة من الجليد كما هو الحال عليه فى رسوبيات التّل بل تمّ فرزها أثناء ذوبان الجليد. وتتكون هذه الرسوبيات فى معظمها من الرمل والحصى الصغيرة، أى مكونات الحمولة الأرضية، حيث ان دقيق الصخر الأقل حجما يبقى حيث يتم نقله بالماء الناتج عن ذوبان الجليد. ونظراً لمكوناتها من الرمل والحصى الصغيرة تعمل كتل الرسوبيات الطبقية كمصدر لمواد رصف الطرق ومشاريع البناء الأخرى.

سهول رسوبيات الجليد المنقول وسلاسل رسوبيات الوديان الجليدية

وفى الوقت الذى يتكون فيه مورين النهاية يعمل الماء الناتج عن ذوبان الجليد على نقل بعض محتويات التّل الى الأمام. وعادة ما يندفع الماء الناتج عن ذوبان الجليد فى جداول غالبا ما تضيق بحمولة مياهها، المعلقة بالاضافة الى حملها كمية من الحمولة الأرضية. وبمغادرة الماء للمجلد



شكل 11 ـ 22

جزء من حقل تلال الجليد البيضاوية، ببالميرا. خريطة مبينة على 7.5 دقائق. تدل شدة الانحدار من ناحية الشمال على جهة تقدم الجليد.

يتحرك فى منطقة مفتوحة مما يعمل على تناقص سرعته فجأة وبالتالى ترسيبه لحمولته الأرضية ثم انسياب الماء فى شبكة قنوات للصرف على شكل جداول (شكل 9 ـ 15). وبهذا تتراكم كتل الرسوبيات الطبقية بمحاذاة معظم حواف مورين النهاية السفلى. وتسمى هذه الظاهرة بسهل **رسوبيات الجليد المنقول** وذلك عند إرتباطها بصفيحة جليدية. أما عند اقتصارها على واد جبلى تعرف بسلسلة **رسوبيات الوديان الجليدية**.

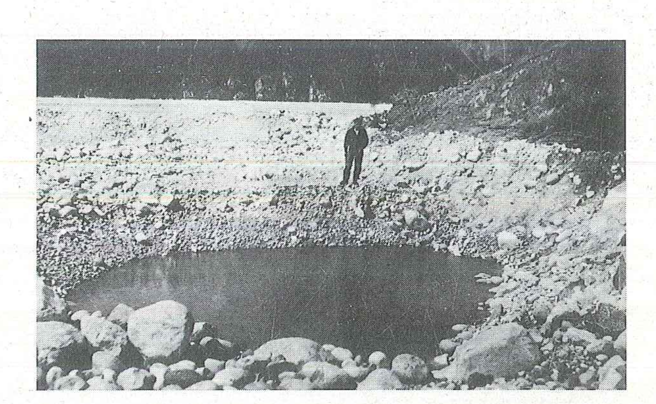
وكثيرا ما تميز سهول رسوبيات الجليد المنقول حفر أو منخفضات تسمى **الأخاديد الدائرية** (شكل 11 ـ 23). وتتكون هذه الفجوات التى توجد أيضا فى رسوبيات التِّل عند ذوبان قطع كبيرة من الجليد الراكد المغروزة جزئيا أو كليا داخل الرسوبيات الجليدية. وبالرغم من أن معظم الأخاديد الدائرية لا يزيد قطرها على إثنين من الكيلومترات فإن بعضها وجد بولاية منيسوتا الأمريكية بقطر يزيد على 10 كيلومترات. كما أن عمقها النموذجى لا يزيد على 10 أمتار فإن بعضها يصل 50 مترا. وفى كثير من الأحيان تتحول هذه الحفر الى برك أو بحيرات بعد ملئها بالماء.

رسوبيات خط التلامس مع الجليد

ويصل المجلد عند إضمحلاله الى نقطة يتوقف فيها عن التدفق. وعندها يركد الجليد. وبمرور الوقت يعمل الماء الناتج عن ذوبان الثلج والمنساب من فوقه وتحته وبداخله الى تجميع كتل الرسوبيات الطبقية. وبذوبان الجليد الكامل تبقى هذه الرسوبيات على شكل مساطب ومرتفعات تعرف فى مجموعها برسوبيات خط التلامس بالجليد وتصنف حسب أشكالها.

فبعض هذه الرسوبيات يأخذ شكل تلال شديدة الانحدار تسمى **الكيم** (شكل 11 ـ 24). وتتكون بعض الكِيَمْ بتجميع مكوناتها فى حفر داخل أو فوق الجليد الراكد. ويتكون البعض الآخر على شكل دلتا أو مراوح ناتجة عن تسرب الماء خارج الجليد. وبذوبان الجليد تنهار هذه الكتل لتكوّن أكواماً مبعثرةً وغير منتظمة من الرسوبيات الجليدية.

وعند تواجد الجليد بالوديان تتكون مساطب على جانبى الوادى تسمى **مساطب الكيم**. وعادة ما تتراكم مكونات هذه المساطب فى شريط رسوبى طبقى ضيق بين الجليد وجانب الوادى، وذلك بواسطة مجارى المياه الملقية بحطام الصخر على طول حافة الكتلة الجليدية المنحسرة. كما توجد فى المناطق الجليدية تلال متعرجة من الرمل والحصى قد يصل ارتفاعها الى 100 مترٍ ويزيد طولها على 100 كيلومترٍ غير أنه يبلغ حجم الكثير منها أقل من ذلك بكثير. ويعتقد أن



شكل 11 ـ 23

مستنقع مائى بأخدود دائرى بنهاية مجلد بيرو بجنوب شرقى آلاسكا.



شكل 11 ـ 24

الكيم الأبيض بغابة كيتل مورين وسكنسون.



شكل 11 ـ 25

يكشف إنحسار المجالد عن الكثيب وهو مرتفع منحنى من الرمل والحصى الصغيرة تظهر هنا فى وسط الصورة.

الظواهر التى تعرف بالكثيب قد ترسبت كمرتفعات من جداول تجرى فى قنوات فوق أو تحت أو من داخل الجليد (شكل 11 ـ 25). ويلاحظ أن المياه الناتجة عن ذوبان الجليد تعمل على حمل أحجام مختلفة من الرسوبيات غير أن هذه المياه المضطربة لا تسمح بترسب الأحجام الصغيرة منها.

نظرية التجلد والزمن الجليدى

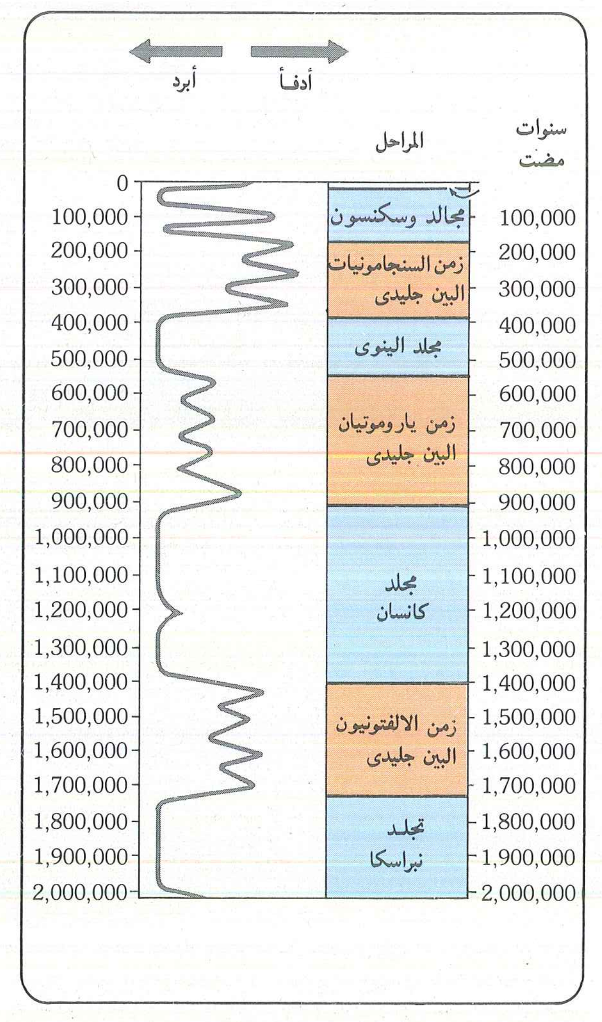
لقد سبقت الاشارة عدة مرات الى الزمن الجليدى. وهو الوقت الذى كانت فيه الصفائح الجليدية والمجالد الألبينية أكثر انتشارا من الوقت الحاضر. وكما سبق أن ذكرنا أن التفسير الأكثر تداولا لما يعرف الآن بالرسوبيات الجليدية أنها قد نقلت بواسطة الجبال الجليدية العائمة أو بواسطة فيضان جائح. إذاً ما الذى أقنع الجيولوجيين بوجود زمن جليدى تجمعت خلاله هذه الرسوبيات والظواهر الأخرى؟

فى سنة 1821 م قدم مهندس سويسرى يدعى أجناز فينيتر بحثا إقترح فيه ان ظواهر جليدية قد حدثت على مسافات بعيدة من حواف المجالد بجبال الألب. أى أن المجالد قد احتلت مواقع أسفل موقعها الحالى بكثير. وفى سنة 1836 م عقد العزم لويس أجاسير، وهو عالم سويسرى أيضا، على إثبات بطلان نظرية فينيتز ومن بعده جين ديشاربنتيير حول نشاط المجالد. غير أن دراسة أجاسيز الميدانية أقنعته بصحة إعتقاد زملائه ومن ثم وضع بعد سنة أسس نظرية الأزمنة الجليدية التى اشتهر بها.

والدليل الذى استعمله أجاسيز والآخرون من بعده لاثبات النظرية الجليدية هو مثال نموذجى لتطبيق المبدأ الجيولوجى الذى يعرف بالانتظام. ولاستنتاجهم بأن بعض الظواهر لا يمكن أن تكون إلا نِتَاج المجالد فقد بدأوا فى إيجاد أبعاد امتداد الصفائح الجليدية عن طريق الرسوبيات المتواجدة بعيدا عن حواف المجالد فى الوقت الحاضر. وبهذا استمر تراكم الأدلة المساندة لنظرية المجالد خلال القرن الثامن عشر.

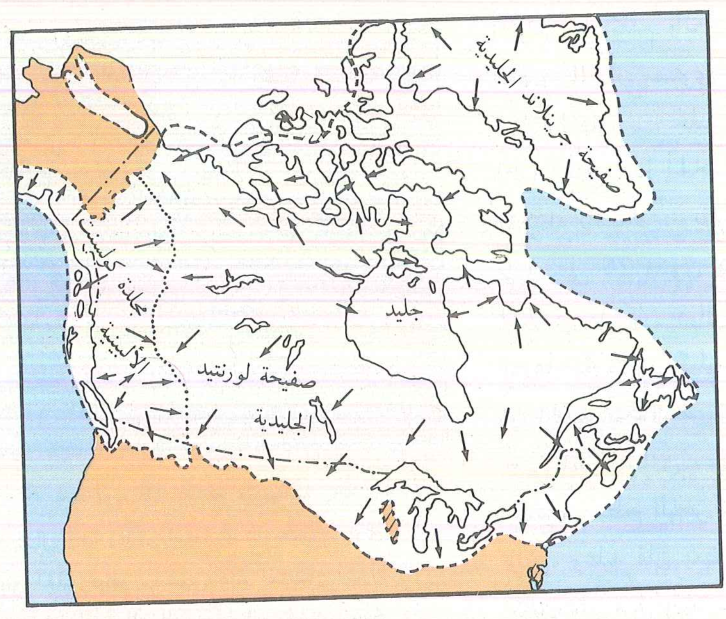
وبتكاتف جهود العلماء تمَّ التعرف على مدى انتشار الصفائح الجليدية.

ومع القرن التاسع عشر عرف الجيولوجيون بدقة أكثر مدى المجالد خلال الزمن الجليدى. بالاضافة الى ذلك اكتشفوا خلال دراستهم أن عدة مناطق قد حوت عدة طبقات من الرسوبيات الجليدية، والتى بكل منها نطاق متكامل من التعرية الكيميائية ومراحل تكون التربة وبقايا نباتات تحتاج الى مناخ دافىء لنموها. وعليه قد أصبح جلياً أن عدة أزمنة جليدية قد توالت على هذه المناطق فصلت بينها فترات طويلة كان فيها المناخ دافئا. وعليه فإن الزمن الجليدى لم يتقدم الجليد خلاله ثم إنحسر فقط بل إنه زمن



شكل 11 ـ 26

تميز البليستوسين بالتذبذب فى وضعه المناخى. تم التعرف على أربعة مراحل جليدية منفصلة. [من د. ب. إركسون وج ولين «تسلسل الأحداث المناخية عبر البليستوسين فى صخور البحر العميقة (مجلة العلوم) » عدد 162 (1968 : 1233)].



شكل 11 ـ 27

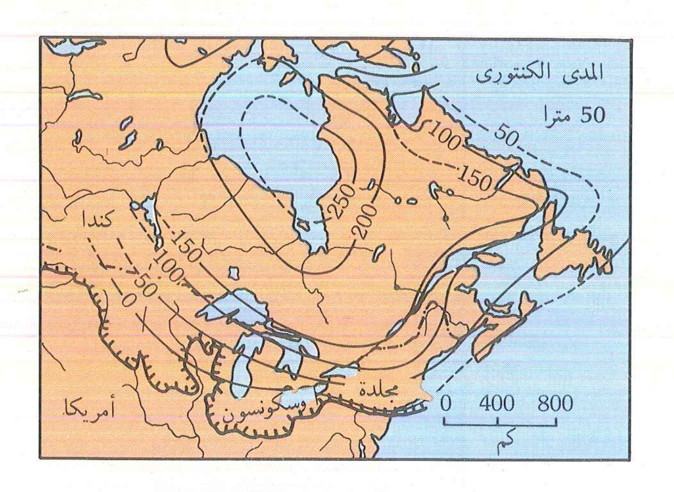
عند أقصى حد لانتشار مجالد البليستوسين غطت 10 مليون كيلومتر مربع من قارة أمريكا الشمالية.

تخللته عدة مراحل وأحداث تميزت بتقدم الجليد وإنحساره عدة مرات. ففى أمريكا الشمالية تمَّ التعرف على أربعة فترات جليدية (شكل 11ـ 26). وقد سميت كل من هذه الفترات باسم الولاية التى تحوى أكمل تكشّف، أو درست بها رسوبيات أحد الفترات لأول مرة، وهى حسب توالى حدوثها: نبراسكا وكانساس والينويز وسكونسون. وتشير الأدلة المستمرة من أوروبا وآلاسكا بأن المد الجليدى قد يكون سابقا للتقدم النبراسكى. فخلال الزمن الجليدى تركت المجالد آثارها على حوالى 30 فى المائة من مساحة اليابسة بالكرة الأرضية، شملت 10 ملايين من الكيلومترات المربعة بأمريكا الشمالية و 5 ملايين من الكيلومترات المربعة بأوروبا و 4 ملايين من الكيلومترات المربعة بسيبيريا (شكل 11 ـ 27). وتقدر كمية الجليد بنصف الكرة الشمالى فى ذلك الوقت بضعفى مقدارها بنصف الكرة الجنوبى، حيث أن الجليد بالقطب الجنوبى لم يستطع الانتشار خارج قارة القطب الجنوبى. وعلى العكس من ذلك فقد عملت أمريكا الشمالية وأوروبا وآسيا كامتداد طبيعى لليابسة إنتشرت فوقه الصفائح الجليدية.

ونعلم اليوم بأن الزمن الجليدى قد بدأ حوالى مليونين أو ثلاثة ملايين سنة مضت أى أن معظم المراحل الجليدية قد حدثت أثناء عصر **البليستوسين**. وبالرغم من انتشار استعمال تسمية البليستوسين للدلالة على الزمن الجليدى فإن هذا العصر لم يشمل كل الفترات الجليدية. فعلى سبيل المثال يعتقد بأن صفائح جليد القارة القطبية الجنوبية قد تكونت 10 ملايين سنة مضت.

بعض المؤثرات غير المباشرة لمجالد الزمن الجليدى

بالاضافة الى التعرية والترسيب فقد كان للصفائح الجليدية بعض التأثيرات الأخرى خلال فترات البليستوسين الجليدية. فمثلا كانت الحيوانات والنباتات مرغمة على الهجرة أمام تقدم الجليد. وحيث أن بعض هذه الكائنات لم يستطع تحمل مثل هذه التغيُّرات فقد إنقرض مثال حيوان الكسلان الأرضى الضخم والنمر المسيف الأسنان وفيلة ما قبل التاريخ المسماة بالمستودون والماموث. بالاضافة الى ذلك فان الكثير من مسارات الأنهار اليوم لا تشبه مساراتها قبل الزمن الجليدى. فمثلا نهر ميسورى كان يجرى الى الشمال تجاه خليج هدسون بينما كان لنهر المسيسبى مسار خلال أواسط



شكل 11 ـ 28
تسبب وزن الجليد بشمال كندا حيث بلغ ذروته الى هبوط مستوى السطح. وعند ذوبان الجليد ارتفع مستوى هذه المناطق ليترك شواطىء الأمس على ارتفاعات عالية اليوم نسبة الى مستوى سطح البحر.

ولاية الينوى وكانت منابع نهر أوهايو بأواسط أمريكا. ويلاحظ أن بعض الأنهار اليوم تجرى بها كميات ضئيلة من الماء بالرغم من شغلها لمسارات عريضة مما يدل على أنها كانت قديما تجرى بها كميات اكبر من مياه الجليد الذائب. هذا وقد وجد أن الساحات التى كانت بؤرة للتراكمات الجليدية مثال سكاندينافيا والدرع الكندى قد زاد ارتفاعها بالتدريج عبر آلاف السنين الماضية. وكما يوضح الشكل (11 ـ 28) فان منطقة خليج هدسون قد ارتفعت حوالى 300 مترٍ. وهذا ايضا ناتج عن المجالد القارية. ولكن كيف يعمل جليد المجالد على حركة القشرة الأرضية؟ يعتقد فى الوقت الحاضر أن وزن ثلاثة كيلومترات من الجليد قد تسببت فى تقعُّر القشرة الأرضية. وبازاحة هذا السمك من الثقل الجليدى فقد عملت القشرة الأرضية على الارتداد الى أعلى تدريجيا منذ ذلك الوقت.

وبالتأكيد فان أكثر المؤثرات بالزمن الجليدى تشويقا وربما إثارة هى انخفاض وارتفاع مستوى سطح البحر المتزامن مع تقدم وانحسار الجليد. فقد أشير فى مقدمة هذا الفصل الى أن مستوى سطح البحر سيرتفع من 60 الى 70 مترا اذا ما اذيب جليد القارة الجنوبية (أنظر الشكل 11 ـ 29). ومثل هذا الحادث سيغمر الكثير من المدن الساحلية المكتظة بالسكان. وبالرغم من أن الحجم الكلى للجليد اليوم يزيد على 25 مليون كيلومتر مكعب فإن حجمه أثناء الزمن الجليدى قد كان حوالى 70 مليون كيلومتر مكعب أى بزيادة قدرها 45 مليون كيلومتر مكعب عن الوقت الحاضر. وحيث أن الجليد يتكون من بخر المحيطات فإن الزيادة فى حجمه تعنى انخفاضاً فى مستوى سطح البحر. وقد اقترح أن مستوى سطح البحر كان أقل بحوالى 130 مترا عن مستواه اليوم. وعليه فان بعض الأراضى التى يغمرها المحيط اليوم كانت يابسة فى وقت مضى. فمثلا كان يقع شاطىء الولايات المتحدة الشرقى مائة كيلومترٍ الى الشرق من مدينة نيويورك، وكانت كل من بريطانيا وفرنسا ملتصقتان خلال ما يعرف اليوم بالقناة الانجليزية، كما كانت آلاسكا وسيبيريا متصلتين خلال مضيق بيرنج وكان جنوب شرقى آسيا أيضا متصلا بالجزر الأندونيسية.

وكما كان تكوّن ونمو الصفائح الجليدية رد فعل لتغير المناخ فإن وجود المجالد نفسها قد تسبب فى تغير المناخ فى المناطق الواقعة خارج نطاقها. فقد كانت درجة الحرارة وبالتالى معدل البخر أقل فى المناطق الجافة وشبه الجافة، بالاضافة الى تكوين العديد من البحيرات التى تعرف **بالبحيرات المطرية**. ومن أمثلة البحيرات المطرية الكبيرة بحيرة بونيفيل بغربى أمريكا والتى يزيد عمقها على 300 مترٍ وتبلغ مساحتها الاجمالية حوالى 50,000 كيلومتر مربع. وقد كانت هذه البحيرة بحجم بحيرة متشيجان اليوم. وبانحسار الصفائح الجليدية أصبح المناخ اكثر جفافا وتناقص مستوى الماء بالبحيرة تدريجيا. وبالرغم من اختفاء بحيرة بونيفيل إلا أن بعضاً من بقاياها ما زال الى الوقت الحاضر. وربما كانت أكثر هذه البقايا شهرة وأكبرها البحيرة المالحة الكبرى بولاية يوتا.

أسباب التجلد

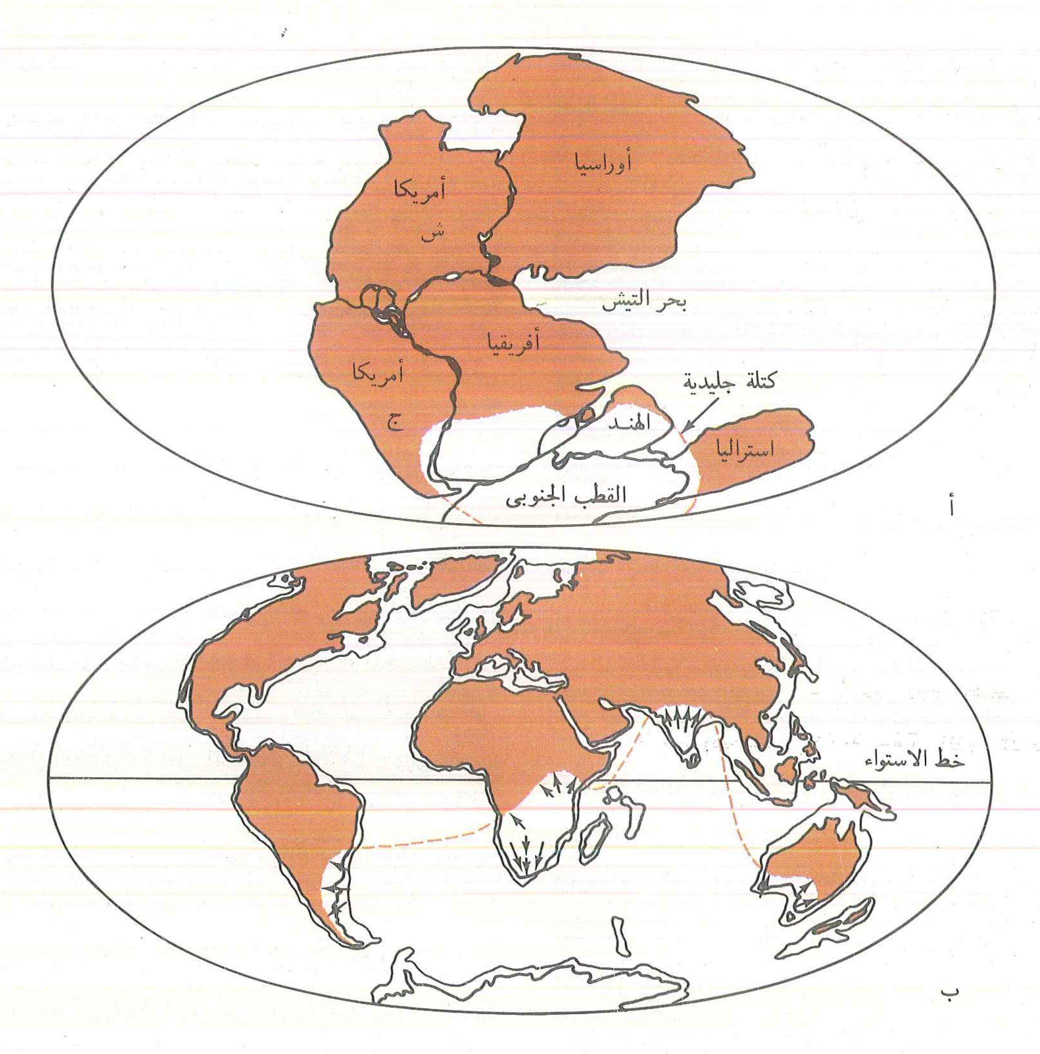
عرف الكثير عن المجالد والتجلد. كما تمت معرفة تكوين المجالد وحركتها وأبعادها ماضيا وحاضرا الى جانب الظواهر التى تصاحبها سواء أكانت نتيجة للتعرية أو للترسيب. غير أنه لم يتم بعد وضع نظرية مقبولة تماما حول أسباب ظاهرة التجلد. وبالرغم من مرور 150 سنة على اقتراح أجاسيز لنظريته حول الزمن الجليدى فانه لم يتفق بعد على مسببات التجلد. وبينما كانت ظاهرة انتشار الجليد نادرة الحدوث فإن الزمن الجليدى الذى شمل عصر البليستوسين لم يكن الوحيد المعروف. فقد دلت على ذلك صخور التِّل التى اكتشفت فى طبقات العصور الجليدية. وتحوى هذه الصخور حطاماً صخرياً محززاً يعلوه سطح منحدر ومصقول الى جانب الاحجار الرملية أو المختلطة التى تبين مميزات رسوبيات الجليد المنقول. فقد تم التعرف على فترتين جليديتين خلال ما قبل الكمبرى أولاهما حوالى بليون سنة مضت والثانية حوالى 600 مليون سنة مضت. كما تم توثيق فترة جليدية أخرى بصخور نهاية دهر الحياة القديمة حوالى 250 مليون سنة مضت.

ولمحاولة تفسير أسباب ظاهرة العصور الجليدية لا بد من الاجابة على سؤالين أساسيين. الأول ما سبب بداية ظاهرة التجلد؟ فلتكوين الصفحات الجليدية لا بد وأن يكون متوسط درجة الحرارة أقل مما هى عليه فى الوقت الحاضر بل وأكثر برودة من معظم أوقات الزمن الجيولوجى. إذاً لا بد من تفسير مقنع لانخفاض درجة الحرارة تدريجيا الى أن تصل الى ظروف التجلد. السؤال الثانى: ما هو سبب التبدل من الأزمنة الجليدية الى الأزمنة البين جليدية الى الجليدية والمعروفة خلال عصر البليستوسين؟ فبينما يتناول السؤال الأول التغير فى درجة الحرارة على مدى زمنى طويل يقاس بملايين السنين فإن السؤال الثانى له علاقة بتبدل درجة الحرارة على مدى زمن أقصر بكثير.

وبالرغم من أن ما كتب علميا تناول بغزارة مجموعة كبيرة من الآراء لتفسير أسباب ظاهرة التجلد فسنتناول هنا فقط بعض الأفكار الرئيسية لمحاولة اعطاء فكرة عامة على ما هو سائد حاليا فى هذا الشأن.

وربما كانت أكثر النظريات جاذبية لتفسير سبب انتشار المجالد ولمرات قليلة خلال الماضى الجيولوجى، هى تفسيرات مبنية على نظرية حركية الألواح (مقدم شرح وافٍ عن حركية الألواح بالفصل الأول والسادس عشر). فالى جانب تفسير هذه النظرية للكثير من الوسائل والظواهر التى أُسيء تفسيرها من قبل، قدمت تحليلا مقبولا لبعض التغيرات المناخية غير المفهومة بما فى ذلك ظاهرة التجلد. وحيث أنه يقتصر تكوينها على القارات، فإنه يتحتم وجودها فى مناطق بعيدة عن خط الاستواء قبل بداية العصر الجليدى. اذ يعتقد كثير من المتخصصين بأن العصر الجليدى يبدأ بنقل القارات على ألواح القشرة الأرضية المتحركة الى مواقع قطبية.

والظواهر الجليدية تدل على أن ما يعرف اليوم بأفريقيا واستراليا وأمريكا الجنوبية والهند قد مرّت بعصر جليدى قرب نهاية دهر الحياة القديمة، أى حوالى 250 مليون سنة مضت. وقد حيرّ ذلك الجيولوجيين لسنين طويلة. هل كان المناخ بهذه المناطق التى تعتبر نسبيا استوائية يشبه فى وقت من الأوقات مناخ جرينلاند وقارة القطب الجنوبى؟ لم يكن هناك جواب مقنع لهذا التساؤل الى أن عرفت نظرية حركية الألواح وقدمت الدلائل على صحتها. وفى وقتنا الحاضر علم الجيولوجيون أن هذه المناطق الحاوية للظواهر الجليدية كانت جميعا فى قارة واحدة تعرف بالبنجيا. وكانت تقع بعيدا عن خط الاستواء الى الجنوب من مواقعها الحالية. وقد انقسمت هذه الكتلة الأرضية الكبيرة فيما بعد الى قطع تحركت على ألواح مختلفة منساقة تجاه مواقعها الحالية (شكل 11 ـ 29). ويعتقد الآن أنه خلال الماضى الجيولوجى قد سبب الانجراف القارى فى كثير من التغيرات الكبيرة فى الظروف المناخية أثناء حركة الكتل الأرضية بالنسبة لبعضها البعض وعلى أبعاد مختلفة من خط الاستواء. ومن المتوقع كذلك أن



شكل 11 ـ 29

(أ) ـ قارة بنجيا العظمى مبينا عليها حدود انتشار الجليد قبل 300 مليون سنة مضت. (ب) ـ القارات فى وقتنا الحاضر. تبين المنطقة المظللة اماكن وجود الشواهد على حدوث التجلد. ويبين الخط المنقط حدود الكتلة الجليدية اذا ما كانت القارات ثابتة.

تكون قد حصلت تغيرات فى حركة الدورة المائية وما يتبعها من نقل للحرارة والرطوبة وتغيرّ فى المناخ. وحيث أن معدل حركة الألواح بطىء، اذ يقدر ببعض السنتيمترات سنويا فإن التغيرُ الكبير فى المواقع يحدث على مدى زمنى طويل. وعليه فإن التغيرّ فى المناخ بسبب الانجراف القارى يكون بطيئا للغاية ويحتاج الى ملايين السنين.

وحيث أن التغيرّ فى المناخ الناتج عن تحرك الألواح القارية شديد التدرج، فإن نظرية الانجراف القارى لا تفسر تعاقب المناخ الجليدى والبين جليدى الذى حدث أثناء عصر البليستوسين. كان لزاما علينا أن نبحث على ميكانيكية أخرى لاحداث تغيرّ فى المناخ على مدى آلاف السنين بدل ملايين السنين. ففى الوقت الحاضر يعتقد

الكثير من العلماء أن التقلب الذى ميّز مناخ البليستوسين كان سببه تغيّر فى مدار الكرة الأرضية. وكان أول من تقدم بهذه الفرضية عالم يوغوسلافى يدعى مولتن ميلانكوفتش، والتى مفادها أن التغيّرات فى كمية الاشعاعات الشمسية القادمة الى الكرة الأرضية هى العامل الرئيسى للتحكم فى المناخ. ووضع لذلك ميلانكوفتش نموذجا رياضيا مفصلا بناء على المعطيات التالية:

1 ـ الانحراف عن مدار الأرض حول الشمس (الاختلاف المركزى).

2 ـ التغير فى الميلان، أى الزاوية بين المحور وسطح مدار الأرض (مقدار الميل).

3 ـ تذبذب محور الأرض.

وباستعمال هذه العوامل حَسِبَ ميلانكوفتش مقدار التغيّر فى الطاقة الشمسية وعلاقتها بدرجة حرارة سطح الكرة الأرضية خلال الزمن الجيولوجى وذلك لمحاولة ربطها بالتبدل فى مناخ البليستوسين. ولتفسير التغيّر فى المناخ بسبب هذه المعطيات الثلاثة يلاحظ أن تأثيرهما إن وجد بسيط ولا يذكر فى كمية الطاقة الشمسية التى تصل الأرض. وعموما يتم الشعور بهذه المتغيرات بالزيادة فى درجة التباين بين فصول السنة. فاعتدال درجة الحرارة فى المناطق البعيدة ومتوسطة البعد من خط الاستواء يعنى زيادة فى كمية الثلوج المتساقطة. بينما انخفاض درجة الحرارة صيفا يحد من ذوبان الثلج.

وقد تم قبول نظرية ميلانكوفتش الفلكية على مدى واسع، ثم قوبلت برفض تبعه قبولها مرّة أخرى على ضوء الدراسات الحديثة. ومن الدراسات الحديثة التى ساهمت فى مساندة هذه النظرية والوقوف الى جانبها دراسة بعض الرسوبيات من أعماق بحرية كبيرة تحوى أحياء دقيقة ذات حساسية عالية للتغيير المناخى، وذلك بغرض وضع دليل منظم للتغيير فى درجة الحرارة طوال نصف مليون سنة. وقد قورن هذا المقياس الزمنى للتغيير المناخى بالحسابات الفلكية لاختلاف المركز ومقدار الميل والتذبذب وذلك للتأكد من وجود أسس للمقارنة. وبالرغم من عمق الدراسة وتعقيد حساباتها، إلا أن النتيجة كانت واضحة، حيث وجد الباحثون أن التغيّر فى المناخ على مدى عدة مئات من آلاف السنين مضت لها علاقة مباشرة بشكل مدار الأرض. أى أن دورات التغير المناخى كانت متزامنة مع أوقات الاختلاف المركزى والميل والتذبذب فى محور الأرض. وقد بينوا بالتحديد أن التغيّر فى شكل مدار الأرض هو السبب الرئيسى لتوالى العصور الجليدية خلال الدور الرباعى.

ودعنا الآن نلخص النظريات التى تعرضنا اليها فى هذا الشأن. تقدم نظرية الانجراف القارى تعليلا للفترات الجليدية المتباعدة وغير الدورية خلال أوقات مختلفة من الزمن الجيولوجى، بينما قدمت نظرية ميلانكوفتش الفلكية والمدعمة حديثا بدراسة ج. د. هيز وزملائه تفسيرا للفترات الجليدية والبين جليدية خلال البليستوسين.

وباختصار يجب التنويه الى أن الأفكار التى تم شرحها هنا ليست الاحتمالات الوحيدة لتفسير العصور الجليدية. وبالرغم من أنهما منطقيتان إلا أنهما لا يخليان من النقد، وليستا الوحيدتين اللتين تحت الدراسة لتفهّم أسباب تَجَلُّدِ العصور الجليدية. فمعطيات كثيرة قد تَجِدُّ وبعضها قد يكون تحت قيد البحث فى هذا الشأن.

أسئلة للمراجعة :

1 ـ ما هو المجلد؟ تحت أى ظروف يتكون جليد المجالد؟

2 ـ أين توجد المجالد اليوم؟ ما هى النسبة التى تغطيها المجالد من سطح الأرض؟ كيف تكون هذه المساحة مقارنة بتلك التى غطتها خلال البليستوسين؟

3 ـ صف طريقة تدفق الجليد. هل يتحرك الجليد دفعة واحدة فى المجالد الألبينية؟ إشرح.

4 ـ لماذا تتكون التصدعات الجليدية فى الجزء العلوى من المجالد ولا تتكون تحت عمق 50 مترا؟

5 ـ تحت أى ظروف تتقدم مقدمة جليد المجلد؟ تتراجع؟ تبقى فى مكانها؟

6 ـ صف طرق التعرية بالمجالد.

7 ـ كيف تختلف الوديان الجبلية الجليدية عن باقى الوديان الجليدية غير المتجلدة؟

8 ـ عدّد وصف الأشكال المتوقع وجودها نتيجة للتعرية الجليدية ـ منطقة المجالد الألبينية.

9 ـ ما هو الانجراف الجليدى؟ ما هو الفرق بين التّل ورسوبيات الجليد المنقولة؟ ما هو تأثير الرسوبيات الجليدية على طبوغرافية المنطقة بصورة عامة؟

10 ـ اذكر الأنواع الخمسة الأساسية للمورين وما هى الخصائص المشتركة بين أنواع المورين؟ على أى شىء يدل المورين الطرفى ومورين الانحسار؟

11 ـ كيف تتكون الأخاديد الدائرية؟

12 ـ فى أى اتجاه كانت تتحرك الألواح القارية المؤثرة فى المنطقة المبينة بالشكل 11—23 ؟ اشرح كيف تمكنت من تقرير ذلك.

13 ـ ما هى رسوبيات خط التلاشى؟ ميّز بين الكيم والكثيب.

14 ـ تطور نظرية المجالد مثال جيد لتطبيق مبدأ الانتظام. اشرح ذلك باختصار.

15 ـ لقد تم التعرف بأمريكا الشمالية على أربعة فترات جليدية رئيسية. اذكرها بترتيب حدوثها.

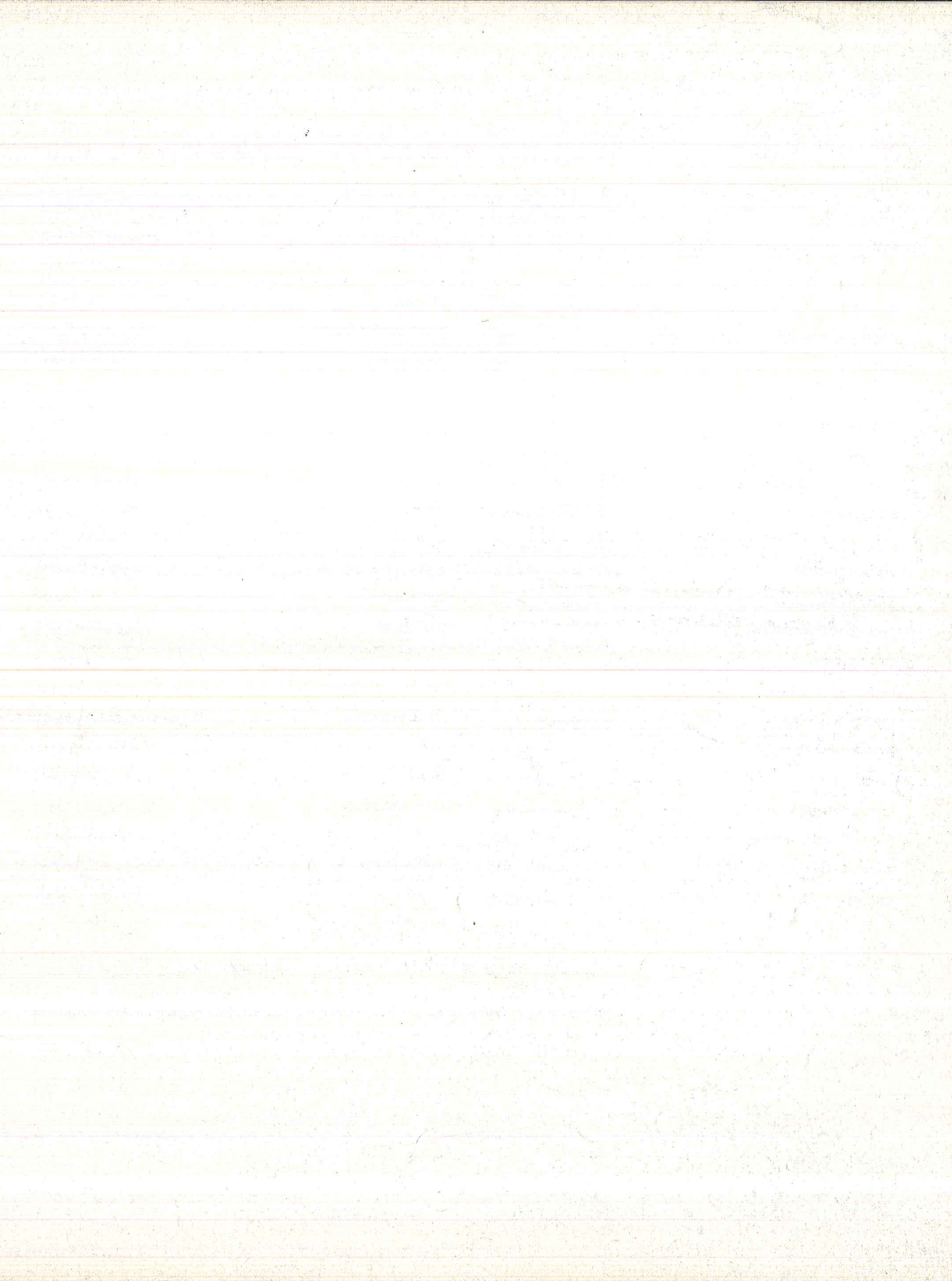
16 ـ كان الجليد بنصف الكرة الشمالى أثناء عصر البليستوسين ضعف ما كان عليه بنصف الكرة الجنوبى. اشرح ذلك باختصار.

17 ـ اذكر ثلاث مؤثرات غير مباشرة للزمن الجليدى.

الكلمات الدالة :

إستئصال	ablation
إقتلاع / إحتجار	plucking
إنزلاق قاعدى	basal slip
إنشعاب	calving
بحيرات خرزية	pater noster lakes
بحيرة مطرية	pluvial lake
برك جبلية	tarn
تحزز جليدى	glacial striations
تموّر	surge
تصدع جليدى	crevasse
تِلْ	till
تلال جليدية بيضاوية	drumlin
عصر البليستوسين	Pleistocene Epoch
خط الثلج	snowline
دقيق صخرى	rock flour
رسوبيات جليدية شاردة	glacial erratic
رسوبيات خط التلامس	ice contact deposit
رسوبيات طباقية منجرفة	stratified drift
رسوبيات منجرفة	drift
زقاق بحرى	fiord
سهل رسوبيات الجليد المنقول	outwash plain
سلاسل رسوبيات الوديان الجليدية	valley train

صخور التِّل	tillite
أخاديد دائرية	kettle
فيرن	firn
كثيب	esker
كشط	abrasion
كيم	kame
مجلد	glacier
مجلد ألبينى	alpine glacier
مجلد قارى	continental glacier
مدرج جبلى	cirque
صخور أصنام الأغنام	roche moutonnee
مساطب الكيم	kame terrace
مضيق جليد جبلى	col
منخفض جليدى	glacial trough
مورين أرضى	ground moraine
مورين الانحسار	recessional moraine
مورين النهاية	end moraine
مورين الطرف	terminal moraine
مورين الوسط	medial moraine
مورين جانبى	lateral moraine
نتوء جبلى	arete
نتوءات مبتورة	truncated spur
نطاق التجمع	zone of accumulation
نطاق التصدع	zone of fracture
وادى معلق	hanging valley

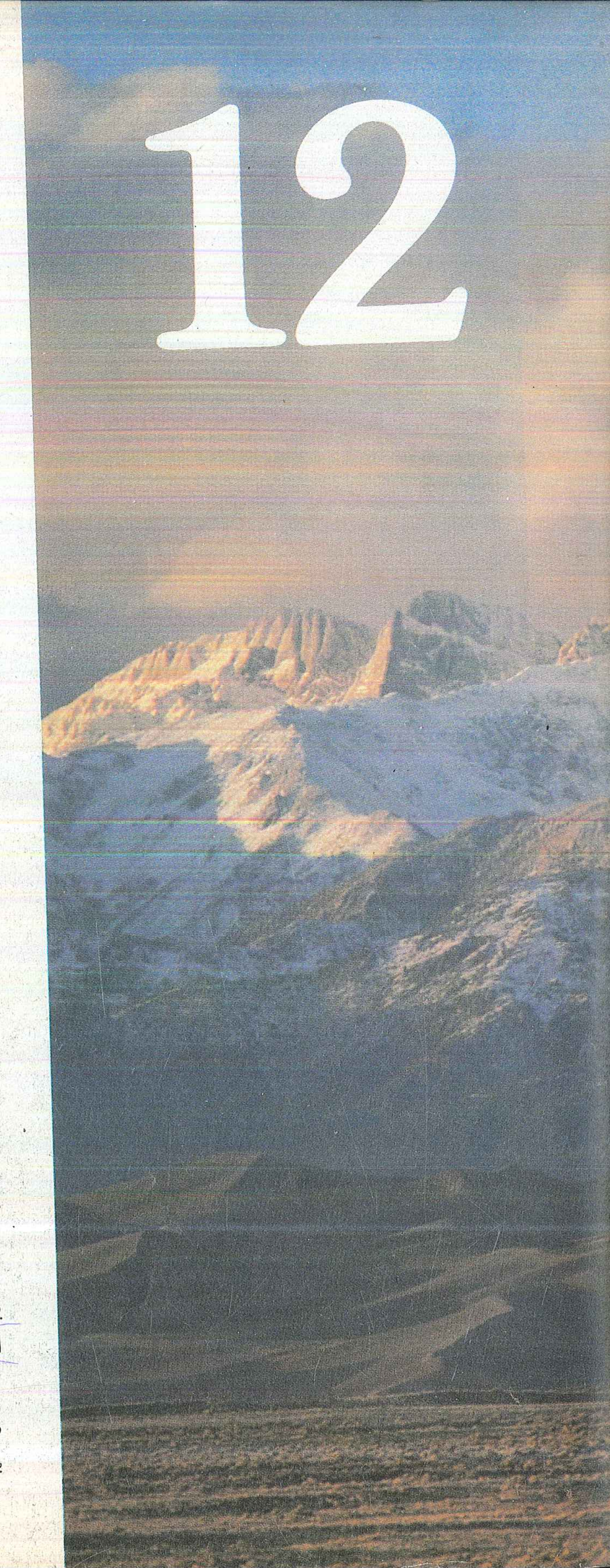


12



الصحارى والرياح





الصحارى

تعنى كلمة صحراء المنطقة المهجورة أو القاحلة. وبالطبع فإن الكثير من الصحارى ليست مهجورة ولكنها مأوى للكثير من البشر. وباستثناء المناطق القطبية فإن معرفتنا بالصحارى أقل من أى بقعة على هذه الأرض. فمثلا لا تغطى الكثبان الرملية كل أرجاء الصحارى كما هو معروف عنها. فالكثبان الرملية توجد ببعض المناطق الصحراوية، وهى من معالمها المميزة ولكنها تمثل نسبة ضئيلة من المجموع الكلى لمساحة الصحراء. فالصحراء الكبرى، وهى أوسع الصحارى فى العالم رقعة، تغطى الكثبان الرملية 10 % فقط من مساحتها. أما الغطاء المثالى للصحارى فهو يتكون من طبقات صخرية مكشوفة أو رقعة فسيحة من الأحجار.

وادى سان لويس بجنوب كولورادو. البعض من الكثبان الرملية بشرقى هذا الوادى تعتبر من اعلى كثبان العالم الرملية.

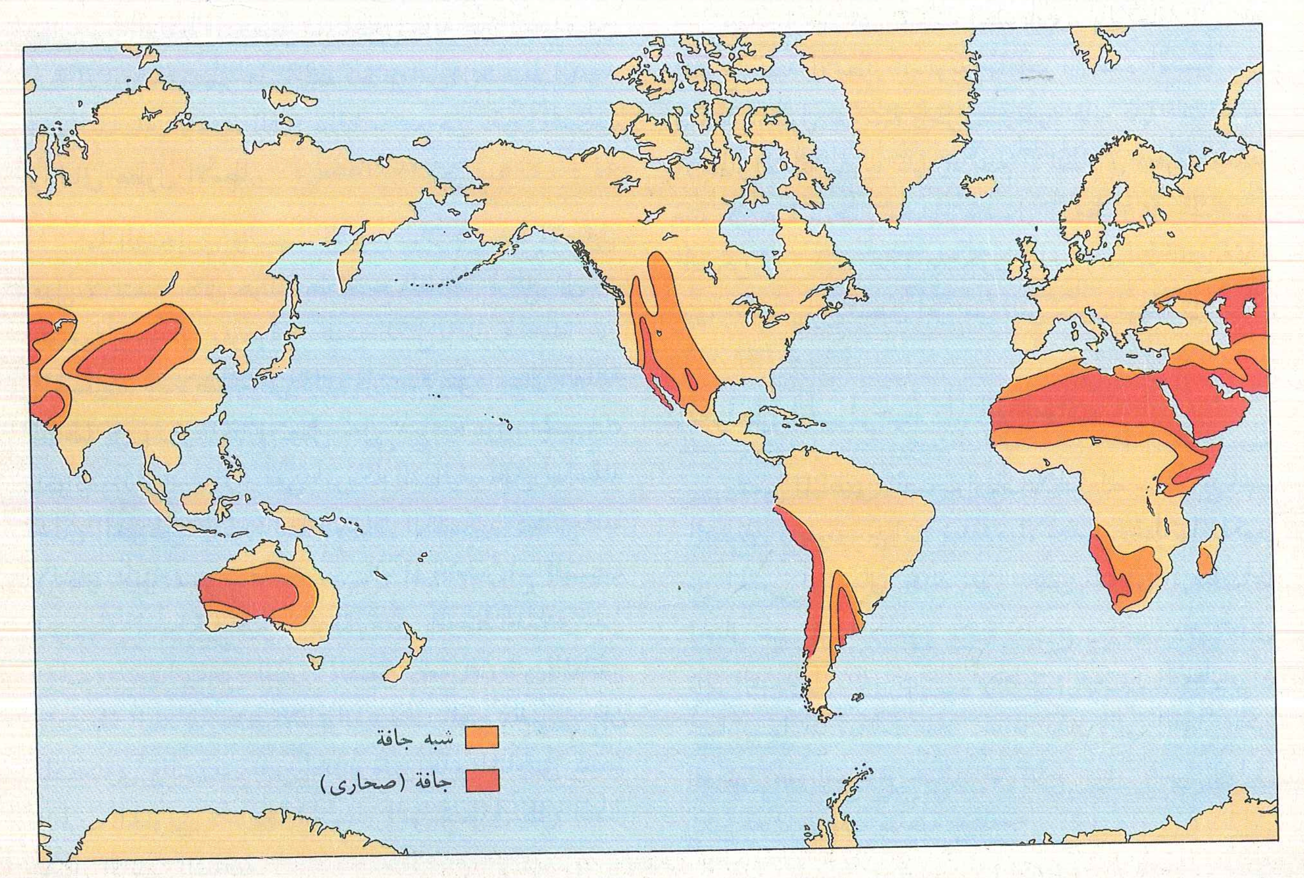


شكل 12 ـ 1
منظر بصحراء سوناران بولاية أريزونا. كما تلاحظ توجد أنواع متعددة من الحياة بمناطق المناخ الجاف.

وكون المناطق الجافة خالية من أى حياة هى مغالطة أخرى. فبالرغم من أنها محدودة العدد مختلفة النوع فان الحياة النباتية عادة ما تكون موجودة (الشكل 12 ـ 1). وتختلف النباتات الصحراوية من مكان الى آخر، غير أنه لها ميزة واحدة وهى قدرتها على ملاءمة ظروف الجفاف. وتسمى هذه النباتات بالجافوفية. وكثير منها ذات أوراق أو سيقان أو فروع شمعية للحد من المياه المفقودة. وبعض هذه النباتات عديم الأوراق أو أن أوراقه صغيرة بالاضافة الى أن جذور بعضها تمتد الى أعماق كبيرة للوصول الى الرطوبة. بينما للبعض الآخر شبكة جذرية كبيرة وقريبة من السطح لامتصاص اكبر كمية من مياه الأمطار النادرة الهطول فى هذه المناطق. وغالبا ما تكون سيقانها مدعمة بنسيج اسفنجى له القدرة على تخزين كمية تكفى احتياج النبات بين مواسم الأمطار. وبالرغم من أنها بعيدة فى توزيعها عن بعضها البعض وتقدم غطاءً نباتيا غير متكامل إلا أن البعض من أنواع هذه النباتات ينتشر وبكميات كبيرة فى المناطق الصحراوية.

توزيع الأراضى الجافة

تبلغ مساحة الصحارى (المناطق الجافة) والسُهب (الشبه جافة) بالعالم حوالى 48 مليون كيلومتر مربع أى ما يقارب ثلث مساحة سطح الكرة الأرضية. ولا يضاهيها فى



شكل 12 ـ 2

يغطى المناخ الجاف والشبه الجاف حوالى 30 % من سطح الأرض ولا يضاهيه فى ذلك أية مجموعة مناخية اخرى.

ذلك أى تقسيم مناخى آخر. وبالنظر الى التوزيع الجغرافى للصحارى والسهب (شكل 12 ـ 2) نجد أنها ترتكز فى المناطق المتوسطة وشبه الاستوائية.

وتقع المناطق الجافة غير البعيدة من خط الاستواء بجوار مدارى الجدى والسرطان. وشكل 12 ـ 2 يوضح نطاقا صحراويا ممتدا عبر الشمال الأفريقى الى شمال غربى الهند. وبالاضافة الى هذه المساحة الصحراوية هناك صحارى فى مناطق شبه استوائية أخرى تشمل شمال المكسيك وجنوب أمريكا والساحل الغربى لأمريكا الجنوبية وجزءاً كبيراً من استراليا. ويرجع وجود المناطق شبه الاستوائية الجافة الى انتظام ضغط الهواء الجوى حول الكرة الأرضية، حيث يوجد نطاق من الضغط المنخفض بالمناطق الجافة غير البعيدة من خط الاستواء. وتتميز هذه التشكيلات من الضغط الشبه دائمة بالجفاف والهدوء الذى غالبا ما يمنع من تكون السحب وبالتالى هطول الأمطار.

أما الصحارى والسهب الأبعد قليلا من خط الاستواء فهى لا تتميز بكتل هوائية هادئة مع الضغط المرتفع، بل ان جفافها راجع الى وقوعها فى عمق الكتل القارية بعيدا عن المحيطات. وبالاضافة الى ذلك فإن سلاسل الجبال العالية الواقعة فى مسار الرياح تعمل على منع وصول الجبهات الهوائية المحملة بالماء. ففى أمريكا الشمالية تعمل سلسلة جبال الشواطىء وسييرا نيفادا وجبال الكاسكيد كحائل. أما فى قارة آسيا تمنع سلسلة جبال الهيمالايا رياح الصيف الموسمية المحملة بالهواء الرطب من المحيط الهندى من الوصول بعيدا داخل القارة. ولضيق رقعة الأرض بالمناطق المتوسطة البعد من خط الاستواء بنصف الكرة الجنوبى فإن الصحارى والسهب غير منتشرة فى هذه المناطق عدى الطرف الجنوبى لأمريكا الجنوبية التى تقع فى ظل المطر لجبال الانديز الشاهقة.

ما المقصود بالجافة؟

ما هو المقصود بكلمة الجافة؟ أحيانا تعرّف برقم لقياس مقادير هطول الأمطار، مثال 25 سنتيمترا فى السنة. غير أن الجفاف كلمة نسبية تشير الى وضع تفتقد فيه كميات المياه اللازمة للاستهلاك. وقد عرّف علماء المناخ **الجفاف** بالحالة التى تنقص فيها كميات الأمطار عما تفقده الأرض عن طريق البخر. وعليه فإن الجفاف لا يقتصر على كمية الأمطار الهاطلة ولكنه أيضا يرتبط بكمية البخر التى بدورها تعتمد على درجة الحرارة. وبزيادة درجة الحرارة تزداد كميات البخر. فمثلا كمية من الأمطار تبلغ 25 سنتيمترا قد لا تكفى لأكثر من غطاء نباتى بسيط فى المناطق الحارة نسبيا. غير أن مثل هذه الكمية فى منطقة باردة قد تكفى لسد حاجات غابات بكاملها.

ومناخيا فإن أهم مميزات الصحارى، بالاضافة الى قلة مجموع كمية الأمطار السنوية بها، هو أن هذه الكمية غير منتظمة الهطول بين سنة وأخرى. وعموما فانه كلما قلت كمية الأمطار الهاطلة سنويا كلما زاد عدم الانتظام فى هطولها. وعليه فإنه لا يعتمد على معدل هطول الأمطار فى المناطق الصحراوية، حيث عادة ما يكون عدد السنوات التى تقل فيها الأمطار عن المعدل أقل من التى تكون فيها أعلى منه.

العوامل الجيولوجية بالمناخ الجاف

تتميز المناطق الصحراوية بتلالها المدببة، ووديانها الضيقة المحفوفة بجوانب شديدة الانحدار، وغطائها المكون من الحصى أو الرمال، وذلك على عكس المناطق الرطبة ذات الجبال غير المدببة والمميزة بكثرة تعاريج جوانبها. وقد يتخيل زائر الصحراء القادم من المناطق الغزيرة الأمطار أن تضاريسها قد شكلت بفعل عوامل غير التى ألفها. ولكن العكس هو الصحيح حيث أنها نتاج عمل نفس العوامل ولكن تحت ظروف مناخية مختلفة.

ففى المناطق الرطبة نجد أن السطح تغطيه تربة دقيقة البنية نسبيا لضمان غطاء نباتى شبه متكامل. وهنا تكون المنحدرات وحواف الصخور اكثر دائرية، مما يعكس الأهمية

الكبرى للتعرية الكيميائية تحت ظروف المناخ الرطب. وحيث أن محصلة التعرية بالصحارى تتكون معظمها من حطام صخور ومعادن لم يتبدل تركيبها الكيميائى، فاننا نخلص الى القول بأن التعرية الميكانيكية هى نسبيا اكثر أهمية بالمناطق الجافة منها فى المناطق الرطبة. ويرجع ذلك لعدم وجود الرطوبة وندرة الأحماض العضوية الناتجة عن تحلل النباتات. والتعرية الكيميائية ليست غائبة كليا عن المناطق الصحراوية، فعلى المدى الطويل يتكون الطين وطبقة رقيقة من التربة وكثير من معادن السليكون الحديدية التى تتأكسد مضيفة لوناً صديدياً يميز البعض من الملامح الصحراوية.

وفى معظم الأحوال تفتقر مجارى الأودية فى الصحارى الى المياه (شكل 12 ـ 3 أ). وكثيرا ما يلاحظ عابر الصحراء الجسور الممدودة فوق مجارى أودية خالية من الماء. ولكن عندما تمطر فى هذه المناطق، فإنها غالبا ما تفوق كمية المياه المتساقطة فى وقت قصير ما يمكن أن يتخلل منها الى باطن الأرض. وفى غياب غطاء نباتى فإنه لا يوجد ما يعوق جريان الماء على السطح وبسرعة كبيرة كثيرا ما تؤدى الى ما يسمى بالطوفان المحلى (شكل 12 ـ 3 ب). فالفيضان فى أى نهر قد تمر عدة أيام ليصل الى دروته وكذلك ليهبط ثانية الى ما كان عليه بينما الفيضانات فى الصحراء تظهر فجأة وتختفى بنفس السرعة. وحيث أن مكونات سطح الأرض غير مثبتة بغطاء نباتى فإن التعرية الناجمة عن مثل هذه الأحداث تكون ذات تأثير كبير بالصحراء.

وعلى العكس من نظام الصرف المائى بالمناطق الرطبة، فإن مجارى المياه بالمناطق الجافة قلما تتصل ببعضها البعض لتكون روافد لمجرى رئيسى. بل انه من خصائص الصحارى أن تنتهى مجارى مياهها قبل وصولها الى البحار. ولعمق المنسوب المائى فى المناطق الصحراوية فإنه نادرا ما يقوم بتغذية المجارى المائية على السطح.

وفى غياب مصدر دائم يغذى هذه المجارى المائية فإنها تحت تأثير البخر ينضب محتواها المائى بسرعة فى حين يجد ما تبقى منه مساره الى باطن الأرض. أما الأنهار القليلة التى تشق الصحراء مثال نهرى النيل وكولورادو فإن مصدرها يكون خارج الصحراء، وهو غالبا ما يقع، فى مناطق جبلية تكثر فيها الأمطار. وهنا يكون مصدر المياه كافٍ لمعادلة النقصان فى كمية المياه تحت ظروف مجرى النهر الصحراوية حيث أن نهر النيل يقطع مسافة تقدر بألفى كيلومتر من الصحراء دون التحاق رافد واحد به.

وبالرغم من ندرة المياه الجارية بالصحراء، فإنها العامل الرئيسى للتعرية، وذلك على عكس ما يعتقد بأن دور الرياح هو الأهم فى نحت مظاهر التضاريس بهذه المناطق. وتعتبر الرياح ذات فعالية قصوى فى المناطق الجافة دون غيرها غير أن المياه الجارية فى هذه المناطق هى العامل الأساسى فى تشكيل مظاهر السطح بها. وتتركز بالتالى أهمية الرياح فى نقل وترسيب الرسوبيات واستحداث وبناء الكثبان الرملية كما سنرى فى باقى هذا الفصل.

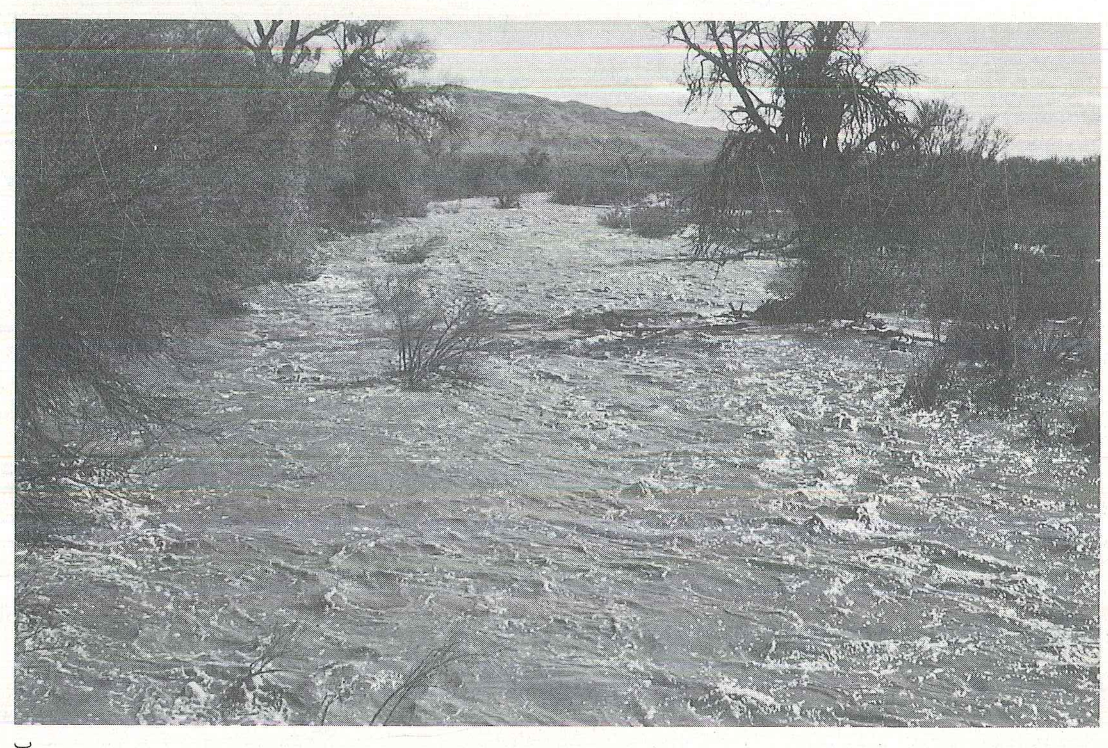
نقل الرياح للرسوبيات

تستطيع الرياح المتحركة، شأنها فى ذلك شأن المياه الجارية رفع الحطام الصخرى غير المتماسك ونقله من مكان الى آخر. وتتحرك الرياح بشكل مضطرب كما هو الحال بالجداول والأنهار. وتزيد سرعتها كلما زاد ارتفاعها عن سطح الأرض. وتقوم بنقل الرسوبيات الدقيقة وهى معلقة بينما تنقل الأحجام الأكثر ثقلا كحمولة أرضية. وهناك إختلافان مهمان بين طرق النقل بالرياح والمياه. الأول أن كثافة الرياح أقل من كثافة الماء وعليه فهى أقل قدرة على رفع ونقل الأحجام الكبيرة. والثانى هو أن الرياح غير محصورة فى مجارى معينة وتستطيع الانتشار على مساحات واسعة وعلى ارتفاع كبير بالهواء الجوى.

الحمولة الأرضية

لقد أثبتت المشاهدة والتجارب الحقلية باستعمال أنفاق الرياح أن الرمال، وهى حمولة الرياح الأرضية، تنتقل

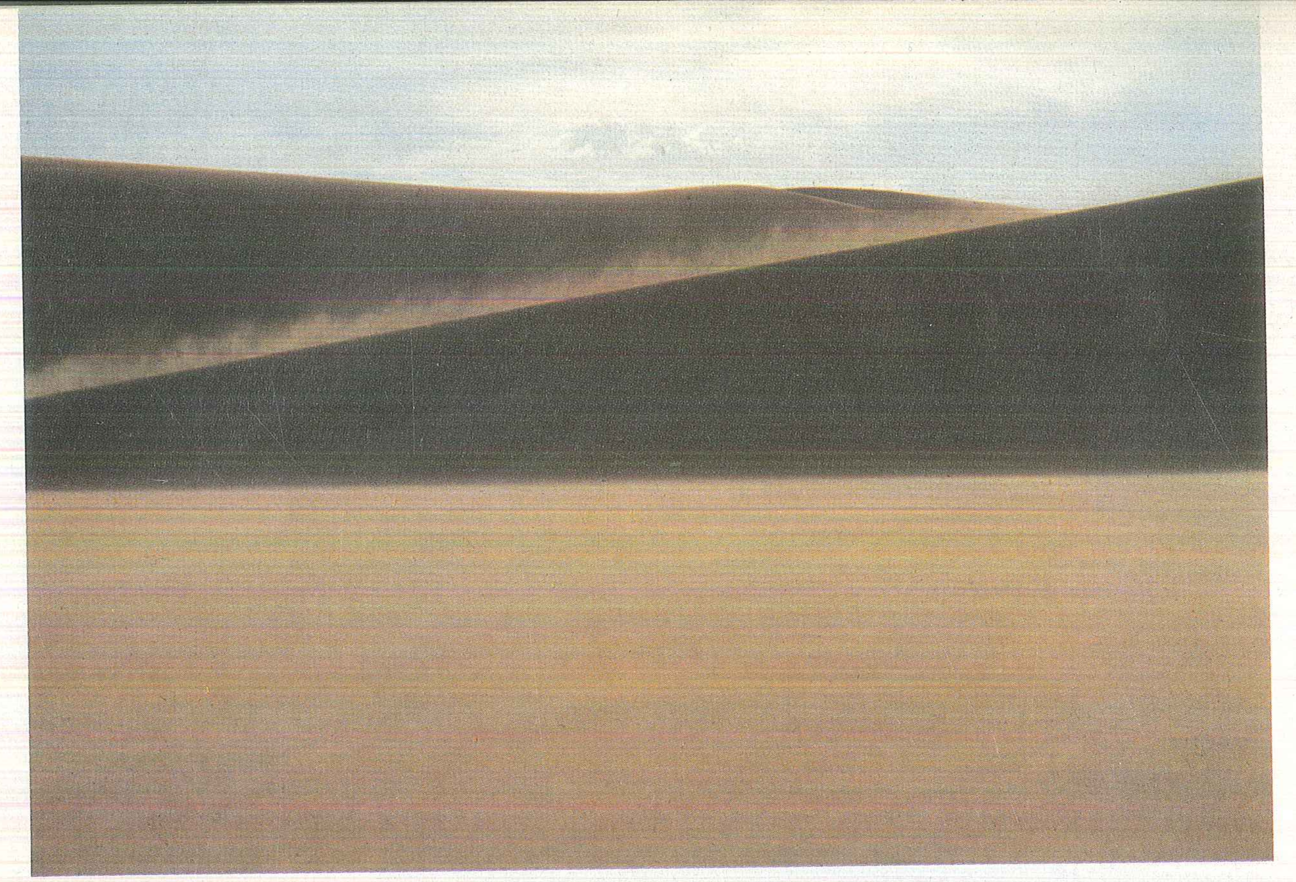
أ



ب

شكل 12 ـ 3

طوفان محلى . (أ) ـ خلال فترة الجفاف. (ب) ـ بعد هطول المطر.



شكل 12 ـ 4

سحابة تكونت بوثب حبيبات الرمل صاعدة الجانب الطفيف الانحدار لأحد الكثبان الرملية.

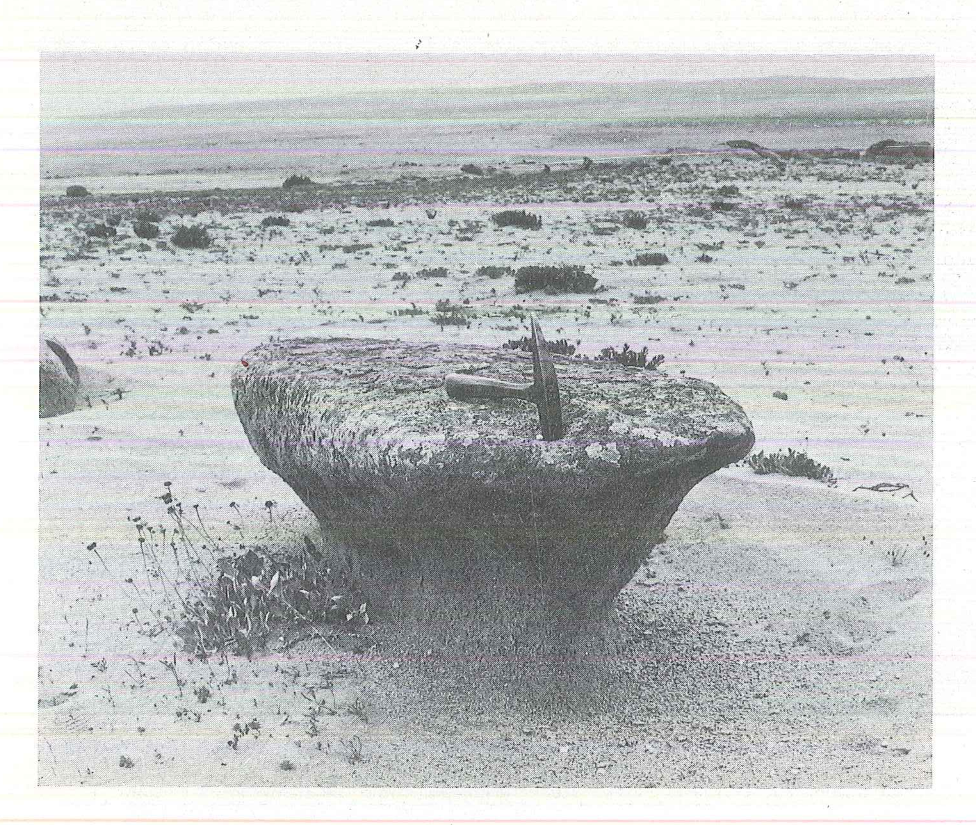
بواسطة القفز على السطح وتسمى هذه الوسيلة بالوثب. وتبدأ حركة الحبيبات عند وصول الرياح الى سرعة تكفى لتخطى سكونها. وفى البداية تتدحرج الحبيبات على السطح حتى تصطدم بحبة أخرى مما يؤدى الى قفزها فى الهواء حيث يتم دفعها الى الأمام بواسطة الرياح الى أن تهبط ثانية تحت تأثير الجاذبية. وعند إرتطامها بالأرض إما أنها تعود للقفز مرّة أخرى أو أنها تدفع بحبة أخرى الى الهواء. وهكذا فى وقت قصير تبدأ سلسلة من الوثبات لتدفع بكمية كبيرة من الرمال إلى الحركة (شكل 12 ـ 4).

وحبوب الرمال المتحركة وثبا لا تنتقل بعيدا من سطح الأرض. فحتى فى حالة الرياح القوية فإن ارتفاعها لا يتعدى المتر. أما فى الظروف العادية فإن ارتفاعها لا يتجاوز النصف متر (شكل 12 ـ 5). أما الأحجام الأكبر، التى لا تستطيع الحبوب الأخرى الواثبة على رفعها من سطح الأرض، فإنها تعمل على دفعها الى الأمام دون رفعها. وقد قدرت النسبة المنقولة بهذه الطريقة بما يقارب 20 ـ 25 فى المائة من حجم الرمال المنقولة فى عاصفة رملية.

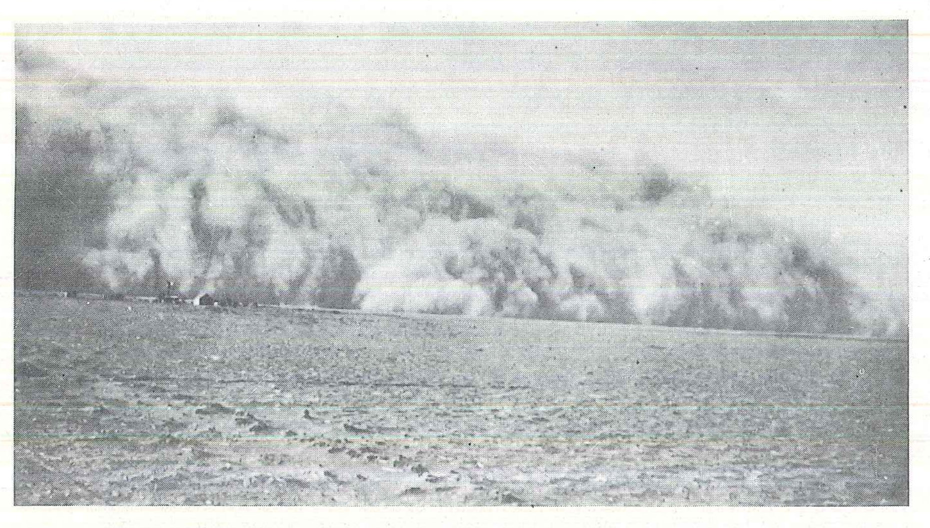
الحمولة المعلقة

على عكس حمل الرياح الرمال فإنه يمكنها أن تحمل الغبار الى ارتفاعات شاهقة بالغلاف الجوى. وحيث أن الغبار بصورة عامة يتكون من جزيئات مفلطحة ذات مساحة سطحية كبيرة نسبة الى وزنها، فإن اضطراب الرياح يعمل على معادلة شد الجاذبية، مما يؤدى الى بقائها معلقة مدة طويلة. وبالرغم من أن كلا من الغرين والطين يمكن نقل حبيباتها بحمولة معلقة، إلا أن الغرين يمثل معظم مكونات الحمولة المعلقة حيث أن التعرية الكيميائية فى الصحارى ينتج عنها كميات ضئيلة من الطين.

والحبيبات الدقيقة سهلة النقل بواسطة الرياح غير أن الصعوبة تكمن فى إنتزاعها من مكانها. والسبب فى ذلك أن



شكل 12 ـ 5
صخر جرانيت تم قطع قاعدته بواسطة الرياح. وحيث أن حبيبات الرمل لا ترتفع كثيرا عن السطح يلاحظ أن الجزء السفلى فقط قد تأثر.



شكل 12 ـ 6
عاصفة غبار. لقد كانت مثل هذه العواصف كثيرة الحدوث نسبيا أثناء الثلاثينات من هذا القرن فى منطقة السهول الضخمة الامريكية.

كلا من الغرين والطين يوجد فى طبقة رقيقة على سطح الأرض، حيث تبلغ سرعة الرياح صفرا. وعليه فإن الرياح وحدها لا تستطيع رفع هذه المكونات دون الاعتماد على الرمال الواثبة فى ذلك أو أى عامل آخر يحرك سكونها. ومثال ذلك الطريق فى منطقة جافة فى يوم عاصف فإن كمية الغبار المتحرك بها لا تذكر اذا تركت وشأنها، إلا أن مرور سيارة على هذه الطريق يدفع طبقة الغبار الرقيقة بها الى الحركة مكونة سحابة كثيفة.

وبالرغم من أن الحمولة المعلقة عادة ما يتم ترسبها على مسافة ليست بالبعيدة من مكانها الأصلى. فالرياح القوية تستطيع نقل كميات كبيرة منها مسافة بعيدة (شكل 12ـ6). ففى الثلاثينات من هذا القرن لوحظ إنتقال الغرين من كانساس بوسط أمريكا الشمالية الى شمال المحيط الأطلسى ومن الصحراء الكبرى الى جزر الأنديز الغربية.

التعرية بواسطة الرياح

تعتبر الرياح غير ذات أهمية كعامل تعرية اذا ما قورنت بالمياه والجليد. فحتى فى الصحارى فإن قليلا من تضاريسها تعتبر الرياح مسئولة مسئولية مباشرة عن تشكيلها. ولا تقتصر الرياح فى عملها بالتعرية على المناطق الجافة والشبه جافة، بل إنها فقط أكثر فعالية فى هذه المناطق. ففى المناطق الرطبة يعمل البلل على لصق الأجزاء ببعضها البعض، كما تشد النباتات التربة الى الأرض مما يجعل عمل الرياح غير ذى أهمية. وأهم متطلبات عمل الرياح حتى تكون ذات فاعلية هى الجفاف وندرة الأعشاب. فمثلا فى الولايات المتحدة عقب موجة الجفاف خلال الثلاثينات اشتد عمل الرياح بسهولها الوسطى حتى سميت المنطقة بكُرَة الغبار.

والانكماش طريقة أخرى للتعرية بواسطة الرياح وهو رفع ونقل المواد غير المتماسكة. وقد لا تلاحظ آثار التعرية بالانكماش حيث أن النقصان يكون من كل السطح فى آن واحد ولكن نتائجها قد تكون ذات أهمية حيث أنها مثلا خلال العواصف الرملية المذكورة فى المثال أعلاه عملت الرياح على نقل ما يقارب المتر من الرسوبيات خلال سنوات معدودة. وكثيرا ما تتكون منخفضات ضحلة نتيجة للتعرية بالانكماش تسمى **بقع النفخ** (شكل 12 ـ 7). ومثال ذلك آلاف البقع المنتشرة من تكساس الى مونتانا، التى يتراوح حجم الواحدة منها من متر واحد فى عمقها وثلاثة أمتار فى قطرها الى خمسين مترا عمقا واتساعا ولعدة كيلومترات.



شكل 12 ـ 7

بقعة نفخ بنبراسكا. وتدل البقايا التى يقف خلفها الحصان على مستوى منسوب الأرض قبل تأثير الرياح.

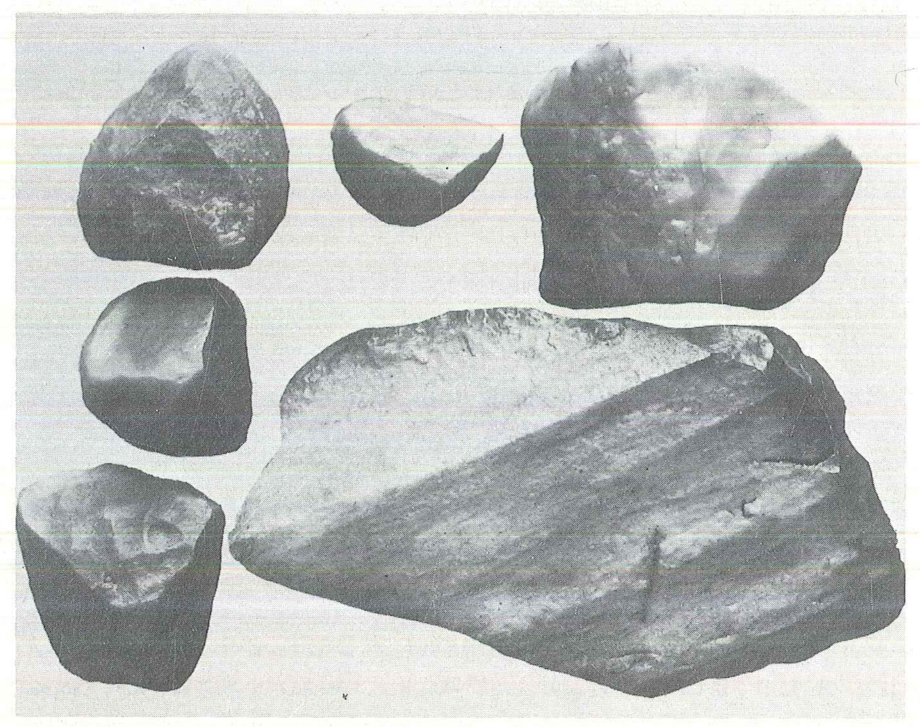
والعامل الذى يحد من عمق هذه الأحواض هو مستوى المنسوب المائى حيث أن الرطوبة والنباتات تقف مانعا أمام تعميقها.

وفى بعض المناطق الصحراوية تنتشر أحجام كبيرة من الحصى التى لا تستطيع الرياح نقلها فى شكل طبقة على السطح تسمى **رصيف الصحراء**. ويتكون عندما تقوم الرياح فى المنطقة برفع ونقل الاحجام الصغيرة وترك الحصى فقط مكونا رصيفا أرضيا (شكل 12 ـ 8). وعند تكوين رصيف الصحراء وهى عملية قد تأخذ مئات السنين تكون حاجزا أمام التعرية بالانكماش.

وتعمل الرياح على التعرية بواسطة **الكشط** شأنها فى ذلك شأن المياه والجليد. ففى المناطق الجافة الى جانب المناطق الساحلية تعمل الرياح المحملة بالرمال الى حفر وتلميع الصخور المتكشفة على السطح. وكثيرا ما ينسب الى الكشط أعمال فوق مقدرته. فالأشكال المعقدة للأعمال الصخرية التى تقف متزنة فوق قواعد صغيرة هى بالتأكيد ليست من نتائج الكشط وحيث أن الرمال قلما تنتقل على

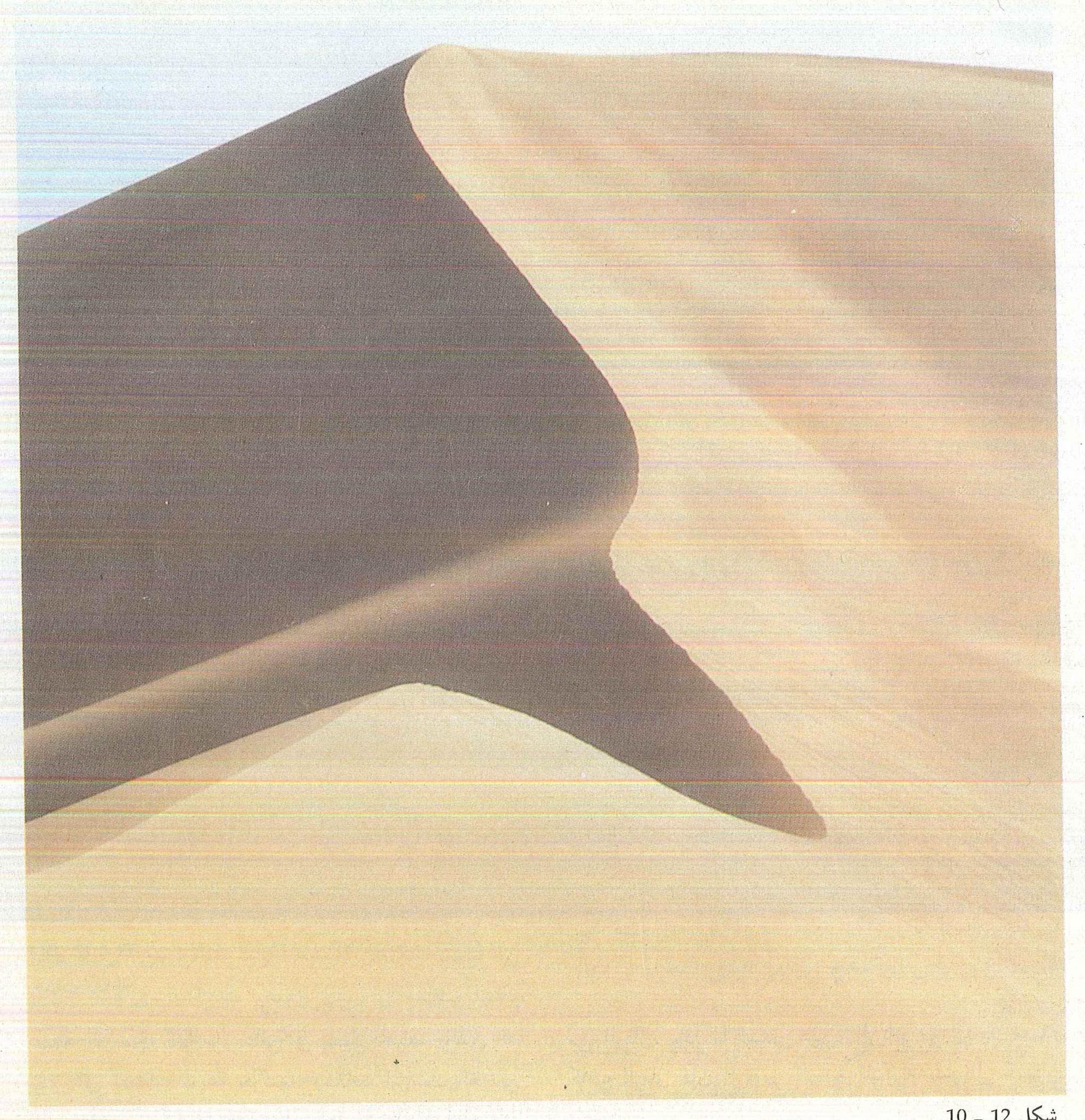


شكل 12 ـ 8
رصيف الصحـراء يتـكون من فتات صخرى مزوّى.



شكل 12 ـ 9
مشغولات الرياح فى الصحراء .

ارتفاع يزيد على المتر فانه من الواضح أن تكون مقدرتها على التعرية محدودة عموديا. غير أن الكشط يقدم أشكالا صخرية مختلفة تسمى **مشغولات الصحراء** (شكل 12 ـ 9) ويكون هنا الجانب المقابل للرياح مصقولا ومنقرا ذا حواف حادة. وقد يكون للحصاة اكثر من وجه مصقول وذلك لتغير وجهة الرياح أو لتبدل وضعها بالنسبة الى اتجاه الرياح.



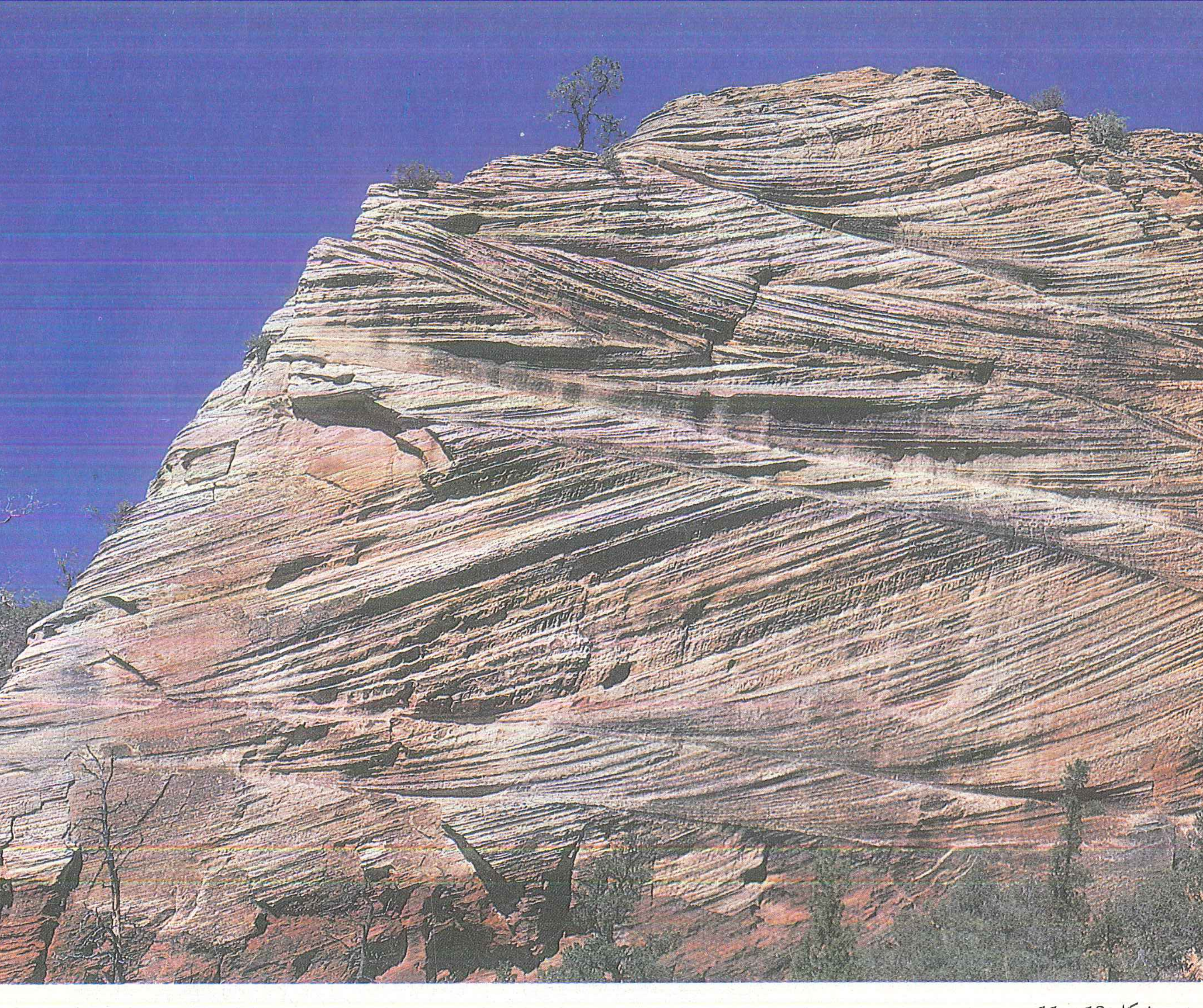
شكل 12 ـ 10
قمة كثيب رملى.

رسوبيات الرياح

لا تعتبر الرياح ذات أهمية كبيرة كعامل مؤثر فى تغيير ملامح الطبيعة، ولكنها عامل ترسيب مهم فى بعض المناطق. وتميز رسوبياتها كثيرا من المناطق الجافة والسواحل الرملية حول العالم. ورسوبيات الرياح نوعان: (1) روابى وهضاب رملية من حمولة الرياح الأرضية. (2) طبقة رقيقة مترامية الأطراف من الغرين المتراكم من الحمولة المعلقة.

الرسوبيات الرملية

تشابه الرياح المياه الجارية حيث أنها تلقى بحمولتها عند نقصان سرعتها وتلاشى طاقتها على الحمل. وعليه تتم

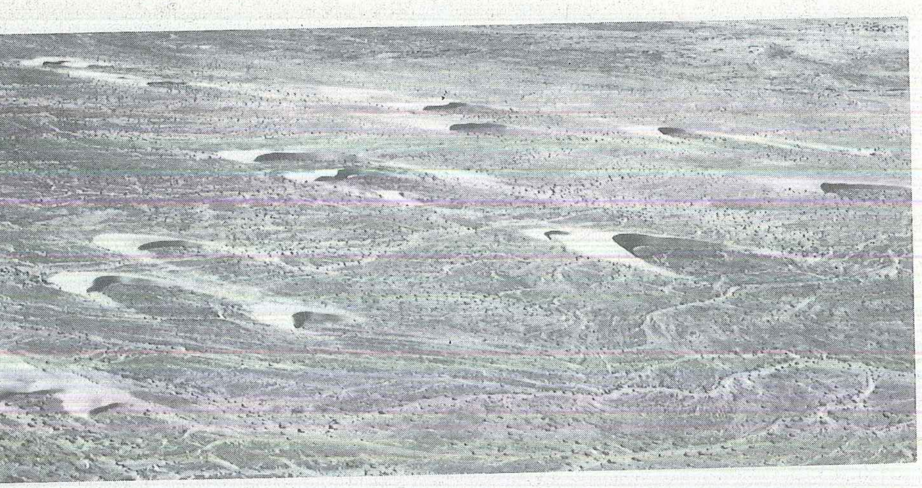


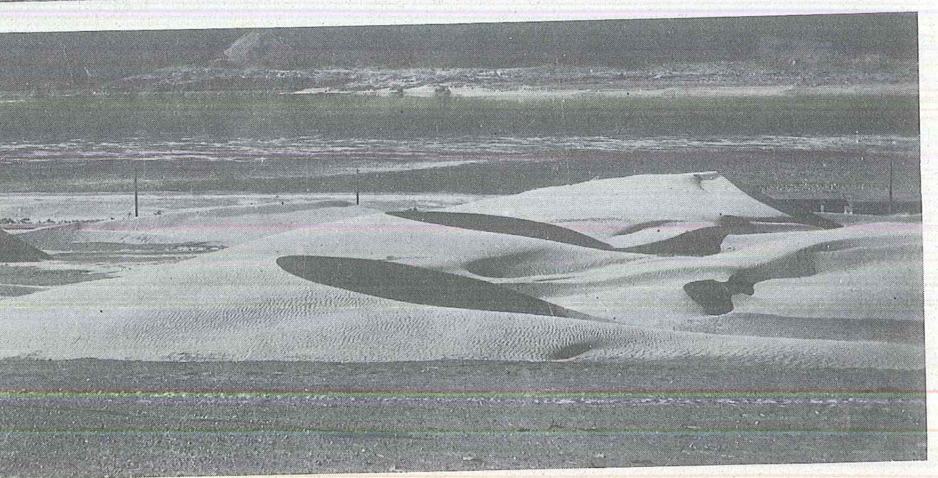
شكل 12 ـ 11
طبقات متقاطعة.

عملية الترسيب كلما برز عائق فى سبيل مجراها والذى قد يؤدى الى نقصان سرعة حركتها. وخلاف الراسب الغرينى الذى قد يكوّن طبقة رقيقة على رقعة واسعة فإن الرياح عموما تلقى بحمولتها من الرمال فى روابى وهضاب تسمى **الكثبان الرملية** (شكل 12 ـ 10).

وعند اصطدام الرياح بعائق كصخر أو مجموعة نباتات فانها تلف من حولها ومن فوقها تاركة منطقة ظل من ورائها ونطاقا أصغر أمامها تقل فيه سرعة الرياح عما حولها. وتتراكم بعض حبيبات الرمل الواثبة فى منطقة الظل هذه ومع زيادة تراكم الرمل يتكون حاجز يعمل على حجز كمية اكبر من الرمال. واذا ما استمر هبوب الرياح مع تواجد مصدر كافٍ للرمال فإن الروابى الرملية المتكونة تنمو الى كثبان رملية.

وعند عمل قطاع فى كثيب رملى يتضح أنه غير متماثل، حيث أن الجانب المحجوب عن الرياح اكثر ميلا من الجانب الآخر. ويتحرك الرمل صاعدا الجانب الأقل انحدارا بواسطة الوثب. وبعد القمة مباشرة تنقص سرعة الرياح ويتراكم الرمل. ومع زيادة كمية الرمل يزداد الانحدار. وبالطبع ستتدحرج كمية منه تحت تأثير الجاذبية. ولهذا يسمى الجانب المحجوب عن الرياح **بوجه الانزلاق**. وعادة ما يشكل وجه





شكل 12 ـ 12

كثبان هلالية. يدل الجانب الضعيف الانحدار على اتجاه هبوب الرياح.

الانزلاق زاوية تبلغ حوالى 34°، وهى زاوية السكون للرمال غير المتماسكة. وزيادة تراكم الرمال مع انحدار جزء منها على وجه الانزلاق يؤدى الى هجرة الكثيب الرملى البطيئة فى اتجاه حركة الهواء.

ومع تراكم الرمال على وجه الانزلاق تتكون طبقات مائلة فى اتجاه هبوب الرياح تسمى **الطبقات المتقاطعة** (شكل 12 ـ 11). وعند دفن الكثبان الرملية تحت طبقات رسوبية أخرى وتتحول الى جزء من سجل الطبقات الرسوبية تغيب ملامح شكلها غير المتماثل، غير أن الطبقات المتقاطعة تبقى على حالها. وبدراسة اتجاه هذه الطبقات يمكن للجيولوجيين تحديد معدل اتجاه الرياح القديمة. وهذه المعلومات مع باقى المعطيات تمكننا من تصور المناخ عبر الزمن الجيولوجى مما يؤدى الى تحديد مواقع الألواح المتحركة للقشرة الأرضية فى تلك الفترة.

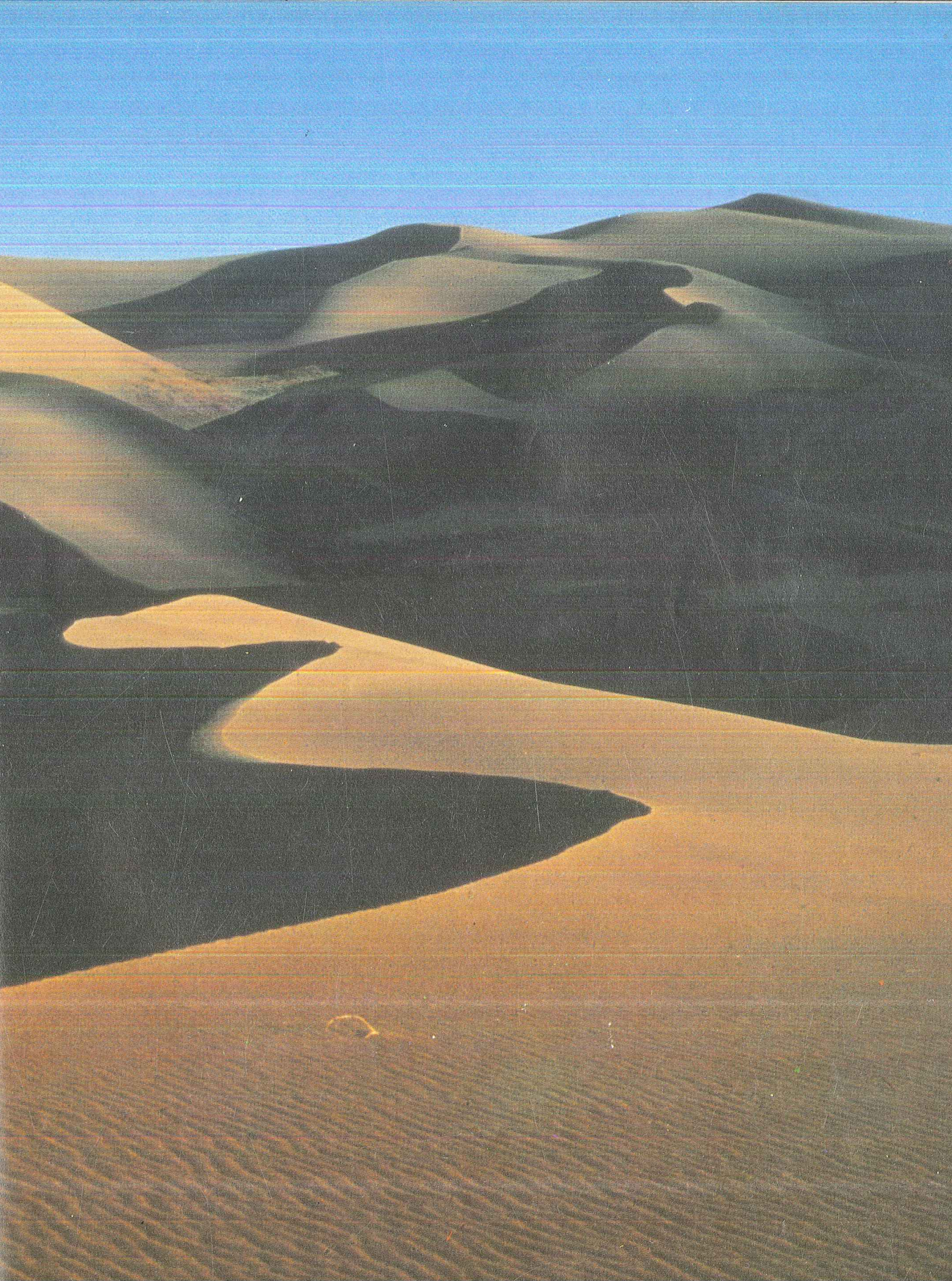
أنواع الكثبان الرملية

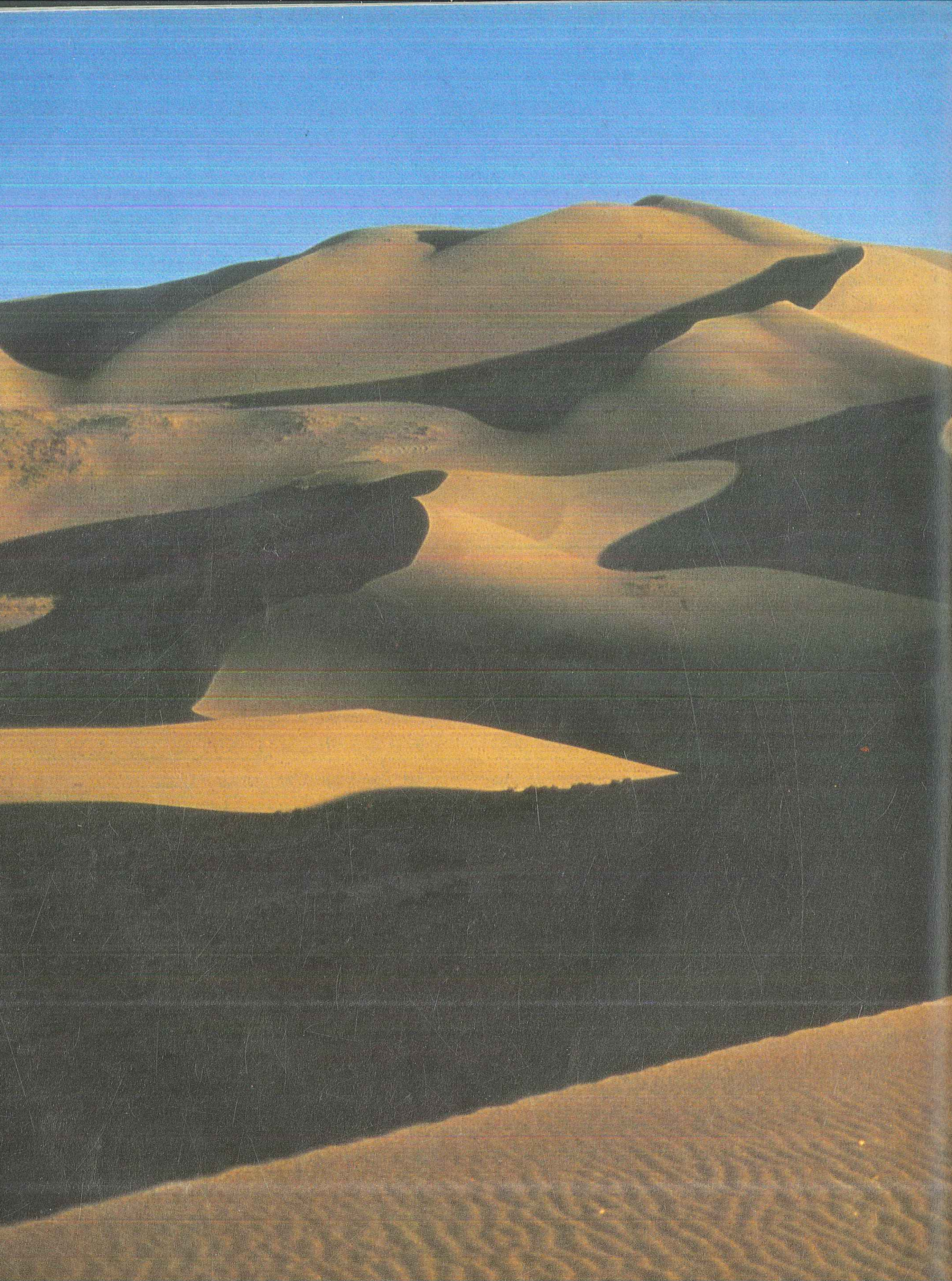
ليست الكثبان الرملية أكواماً متناثرة من الرسوبيات ولكنها منتظمة فى ترتيب واضح. فقد أشار فى هذا الشأن أحد الدارسين الأوائل للكثبان الرملية وهو المهندس البريطانى ر. أ. باجنولد حيث قال بأن المشاهد لا يخلو من الدهشة لبساطة تكوينها ورتابة تعددها ونظام تشكُّلها. كما أوضح أنه فى بعض الأماكن تتحول الملايين من أطنان الرمال فى حركة جد منتظمة محتفظة بشكلها.

الكثبان الهلالية: وهى كثبان منفردة على شكل هلال تشير رأساه فى اتجاه حركة الريح (شكل 12 ـ 12). وتتكون هذه

شكل 12 ـ 13

كثبان رملية عرضية.





الكثبان فى مناطق يكون فيها مصدر الرمال محدوداً وفى أرضية صلدة مسطحة نسبيا عارية من الغطاء النباتى. وتهاجر الكثبان الرملية الهلالية ببطء فى اتجاه الرياح بمعدل يصل الى 15 مترا فى السنة. وهى عموما متوسطة الحجم أو يصل اكبرها الى ارتفاع يبلغ 30 مترا أما أقصى اتساع لرأسيها فيبلغ 300 مترٍ ويكون الهلال متماثلا فى حالة ثبات اتجاه الرياح ومتفاوت الرأسين طولا عند تغيّر اتجاه الريح.

الكثبان العرضية: فى المناطق التى تقل أو تنعدم فيها النباتات مع وجود مصدر كافٍ للرمال تتكون الكثبان فى سلسلة طويلة على هيئة روابى تفصلها أغوار فى اتجاه عمودى على اتجاه حركة الريح، مما أعطاها إسم **الكثبان العرضية** (شكل 12 ـ 13). ومعظم الكثبان الرملية الساحلية من هذا النوع، الى جانب أنها تكثر فى المناطق الجافة حيث يطلق على امتداد سطحها المتموج بحر الرمال.

الكثبان الطولية: والكثبان الطولية التى تعرف أيضا **بكثبان السيف** عبارة عن روابى طويلة من الرمال موازية لاتجاه الريح فى أماكن يكون فيها مصدر الرمل محدود. ويظهر أن اتجاه الرياح يكون متغيرا ولكن فى حدود 90 درجة أو أقل. وبالرغم من أن بعضها يرتفع من ثلاثة الى أربعة أمتار وبطول عدة عشرات من الأمتار فإنها فى الصحارى الكبيرة تصل الى أحجام مهولة. فمثلا فى أجزاء من الشمال الأفريقى والجزيرة العربية وأواسط استراليا تصل الكثبان الطولية الى ارتفاع 100 مترٍ وإلى امتداد يزيد عن 100 كيلومترٍ.

كثبان قطاعات المكافئة: وتختلف كثبان قطاعات المكافئة عن بقية الكثبان فى غطائها النباتى غير المتكامل. وهى تشبه الكثبان الهلالية فى شكلها إلا أن رؤوسها تشير الى عكس اتجاه الريح. وتتكون كثبان القطاعات المكافئة فى المناطق الساحلية حيث تكون الرياح قوية وتتوفر كميات كافية من الرمال. وفى حالة العبث بالغطاء النباتى لهذه الكثبان تعمل التعرية بالانكماش على حفر بقع النفخ فوقها وهنا ينتقل الرمل من داخل هذه المنخفضات متراكما فى حواف منحنية ترتفع بزيادة عماق بقع النفخ.

الراسب الغرينى

يغطى تضاريس بعض المناطق لحاف من الغرين تراكم بفعل الزوابع الرملية على مدى فترة من الزمن قد تصل الى آلاف السنين. ويعرف هذا **بالراسب الغرينى**. وكما يلاحظ فى الشكل 12 ـ 14 فإن هذا النوع من الرسوبيات يعطى مقاطع عمودية عند إختراقه بمجارى الأنهار أو مسار الطرقات العامة. ويفتقر الى أى طبقات رسوبية واضحة. وبالنظر الى توزيع الراسب الغرينى يتضح أن لها مصدران: الصحارى أو رسوبيات الجليد المنقولة. وأكثر رسوبيات العالم الغرينية سمكا ومساحة توجد بشمال وغربى الصين حيث أن سمك الكثير منها يبلغ حوالى 30 مترا، ويصل بعضها الى اكثر من 100 مترٍ. وترجع تسمية النهر الأصفر (هوانج هو) وكذلك البحر الأصفر بالمنطقة المجاورة الى هذه الرسوبيات الدقيقة الصفراء البرتقالية اللون. ومصدر رواسب الصين الغرينية البالغة مساحتها ما يقارب 800,000 كيلومترٍ مربع هو أحواض الصحارى الرسوبية المترامية الأطراف بأواسط آسيا.

والراسب الغرينى بالولايات المتحدة ينتشر بمناطق عديدة تشمل داكوتا الجنوبية ونبراسكا وأيوا وميسورى والنيوى وكذلك أجزاء من سهل كولومبيا. ولا يرجع تطابق توزيع هذه الرسوبيات والمناطق الزراعية بالوسط الغربى وشرقى ولاية واشنطن الى الصدفة. فهذه الرسوبيات تعتبر من أخصب أنواع التربة فى العالم. وتختلف الرسوبيات الغرينية بالولايات المتحدة وأوروبا عن مثيلاتها بالصين فى كونها نتاج غير مباشر للتجلد، حيث أن مصدرها رسوبيات الجليد المنقولة. فعند انحسار جليد المجالد كانت الرسوبيات الناتجة عن ذوبان الجليد تملآن مجارى الكثير من الأنهار ومن ثمَّ حملت بواسطة الرياح الغربية القوية من السهول الفيضانية العارية وترسبت فى طبقة رقيقة غطت الضفة



شكل 12 ـ 14
راسب غرينى بالقرب من نهر الميسيسبى.

الشرقية من الوادى. ويؤكد منشأها هذا زيادة سمكها وحجم حبيبات الراسب الغرينى عند الجانب المحجوب عن الرياح من مخارج نظام الصرف الرئيسى بالمجالد. ومما يؤكد ذلك أيضا النقصان السريع فى سمكها بزيادة بعدها عن مجارى الأنهار، زد على ذلك أن الحبيبات المدببة والناتجة عن التعرية الميكانيكية المكونة للراسب الغرينى تشابه تماما دقيق الصخر الذى يتكون بفعل الطحن الجليدى.

تطور مظاهر التضاريس الصحراوية

تفتقر الصحارى فى العادة الى مجارى مائية دائمة. أى أنها تمتاز بنظام صرف داخلى وهذه تشكيلة من مجارى الأودية التى لا يصل مداها خارج الصحراء. ففى الولايات المتحدة مثلا المنطقة المعروفة منطقة الأحواض والجبال وهى تشمل جنوب اوريجون وكل من نيفادا وغرب يوتا وجنوب كاليفورنيا الى جانب جنوب أريزونا ونيومكسيكو خير مثال على ذلك. فتسمية الأحواض والجبال ملائمة للمنطقة البالغ مساحتها ما يقارب 800,000 كيلومتر مربع بها أكثر من مائتى سلسلة جبلية صغيرة تتراوح ارتفاعاتها من 900 الى 1500 متر فوق مستوى الأحواض التى تفصلها. وفى هذه المنطقة كما فى مناطق أخرى حول العالم تعمل التعرية بدون أن يكون البحر الملاذ النهائى لنتاجها، حيث أن نظام الصرف المائى هو داخلى ومحلى. وحتى فى المناطق

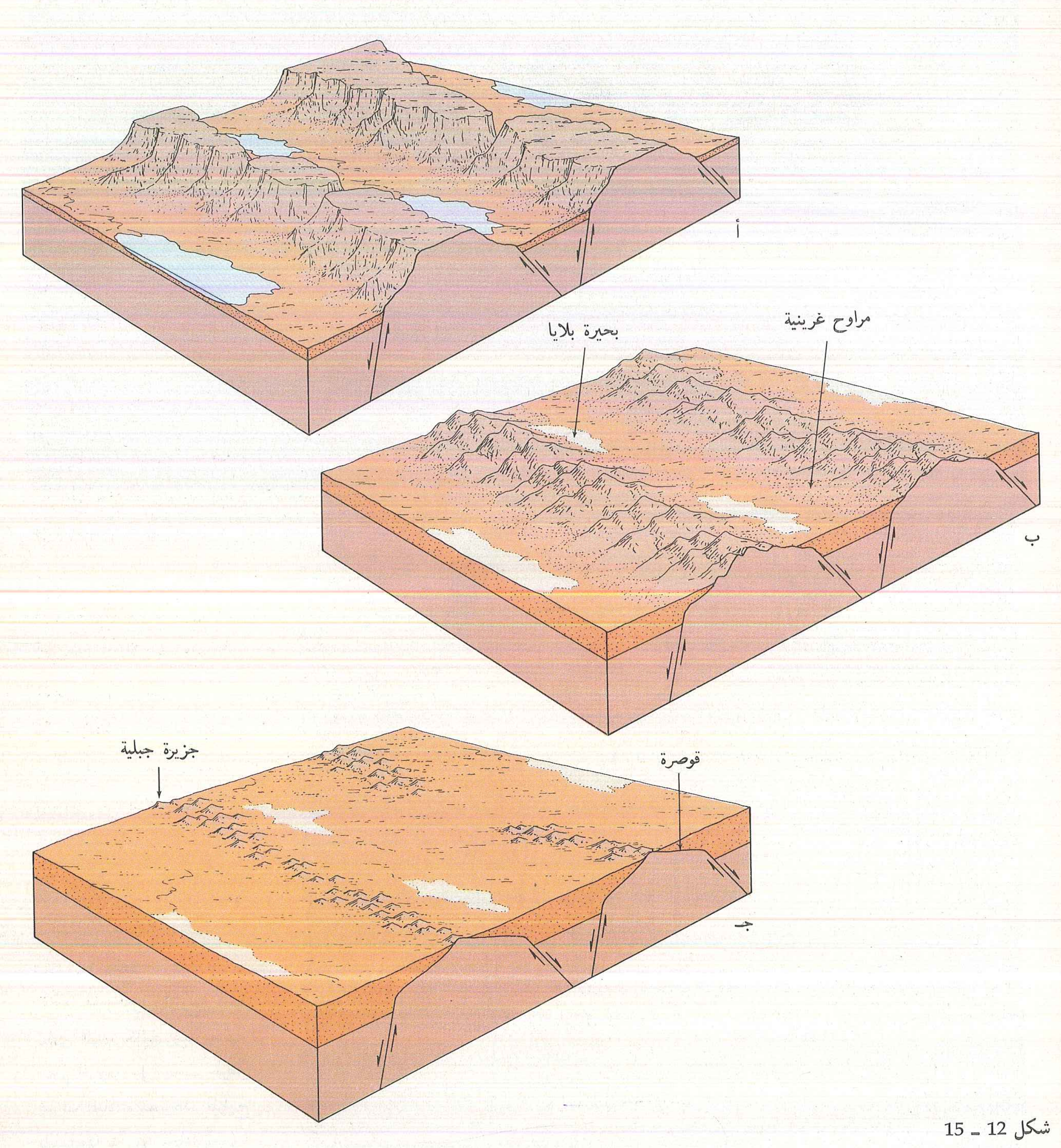
الصحراوية التى توجد بها أنهار يصل مداها الى البحر فإن روافدها إن وجدت تكون قليلة. وعليه فإن شريطاً ضيقاً فقط يحف مجرى النهر يمكن أن يكون مستوى سطح البحر الحد النهائى لتعمقه.

والشكل 12 ـ 15 يصور خطوات تشكُّل تضاريس جبلية مثال منطقة الحوض والجبال المذكورة اعلاه. فبعد مرحلة إرتفاع الجبال عملت المياه الجارية على نحت الكتل الصخرية العالية وترسيب كميات من الحطام الصخرى فى الحوض الترسيبى. وفى هذه المرحلة الأولية تكون التضاريس مرتفعة كلما استمرت عملية التعرية فى خفض مستوى ارتفاع الجبال وملء الحوض كلما نقص الفارق فى الارتفاع.

وأحيانا تسقط الأمطار وتندفع مياهها فى سيل جارف على الأخاديد الجبلية محملة بكميات كبيرة على الجوانب عند المنحدرات الطفيفة بقدم الجبل. وسرعان ما تفقد سرعتها مفرغة حمولتها على مسافة قصيرة. ويكون نتاج ذلك مخروطا من الحطام الصخرى يترسب عند مصب الأخدود ويسمى **المروحة الركامية** (شكل 12 ـ 16). وحيث أن الحطام الصخرى الأكبر حجما يترسب أولا فان رأس المروحة يكون اكثر انحدارا أى ما يقارب 10 ـ 15°. وفى الاتجاه الأقل ارتفاعا يقل عموما حجم الرسوبيات كما يقل الانحدار حتى تندمج مع قاع الحوض الترسيبى. وبتفحص سطح المراوح يتضح وجود جدائل من القنوات تنتقل مجارى المياه بها لردم القنوات السابقة بالرسوبيات. وبمرور السنين تكبر المروحة الغرينية فى الحجم وتندمج مع المراوح المجاورة مكونة ما يسمى **بالبجادا** عند قدم الجبل. ونادرا ما تكون المياه كافية لتخترق البجادا الى وسط الحوض الترسيبى مكونة بحيرة ضحلة تسمى **بحيرة البلايا**. وهذه البحيرات مؤقتة حيث يدوم بقاؤها أياما فقط أو على الأكثر بضعة أسابيع. وتعرف الطبقة المسطحة الجافة التى تتركها البحيرة **بالبلايا** وهى تتكون عادة من غرين وصلصال وأحيانا بعض الأملاح المتبقية من عملية البخر (شكل 12 ـ 17). غير أن رسوبيات الأملاح هنا تكون غير عادية مثال بورات الصوديوم والمعروف بالبورق.

ومع مرور الزمن تتراجع مقدمة الجبل حيث يستمر تآكلها مكونة منحدراً صخرياً منبسطاً محاذياً لمقدمة الجبل شديدة الانحدار وتسمى **القوصرة**. والقوصرة ظاهرة من ظواهر التعرية عادة ما تكون مغطاة بطبقة رقيقة من الرسوبيات بفعل المياه الجارية. أما موضوع الجدل هنا هو كيف نحتت المياه القوصرة.

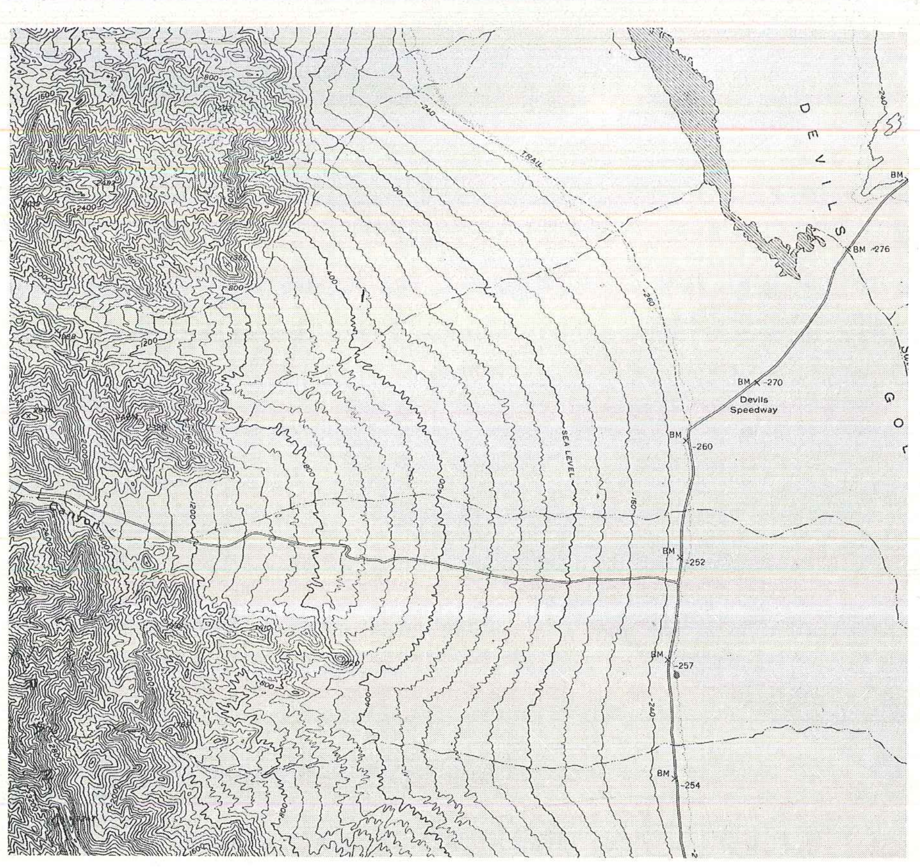
وباستمرار عملية تقطيع الجبل الى مجموعة من الوديان بينها فواصل حادة القمم مع ما يرافقها من عمليات ترسيبية، فإن التضاريس تستمر فى الاضمحلال شيئا فشيئا. ويؤدى انحسار الكتلة الجبلية الى نمو مساحة القوصرة التى تطغى فيما بعد، وبالتالى فان خلال المراحل الأخيرة من عملية التعرية يتحول الجبل الى نتوءات صخرية كبيرة وسط القوصرة. وتعرف هذه النتوءات المعزولة وسط صحراء قديمة **بالجزر الجبلية**. وكل هذه المراحل من تطور مظاهر التضاريس بالمناطق الجافة والمبينة فى الشكل 12 ـ 15 تعرف بمنطقة الحوض والجبال المذكورة أعلاه. فهناك الجبال المرفوعة حديثا والمتأثرة بالتعرية فى مرحلة جد مبتدئة وذلك فى جنوب أوريجون وشمال نيفادا. أما المرحلة المتوسطة فتمثلها منطقة جنوب نيفادا ووادى الموت بكاليفورنيا. أما المرحلة المتقدمة بجزرها الجبلية والقوصرة المتسعة فتوجد فى جنوب أريزونا.



شكل 12 ـ 15

خطوات تطور المظاهر الطبيعية بالجبال الصحراوية. تتناقص التضاريس باستمرار عملية تعرية الجبال والترسيب فى المنخفضات. (أ) ـ مرحلة باكرة. (ب) ـ مرحلة متوسطة. (جـ) ـ مرحلة متأخرة.

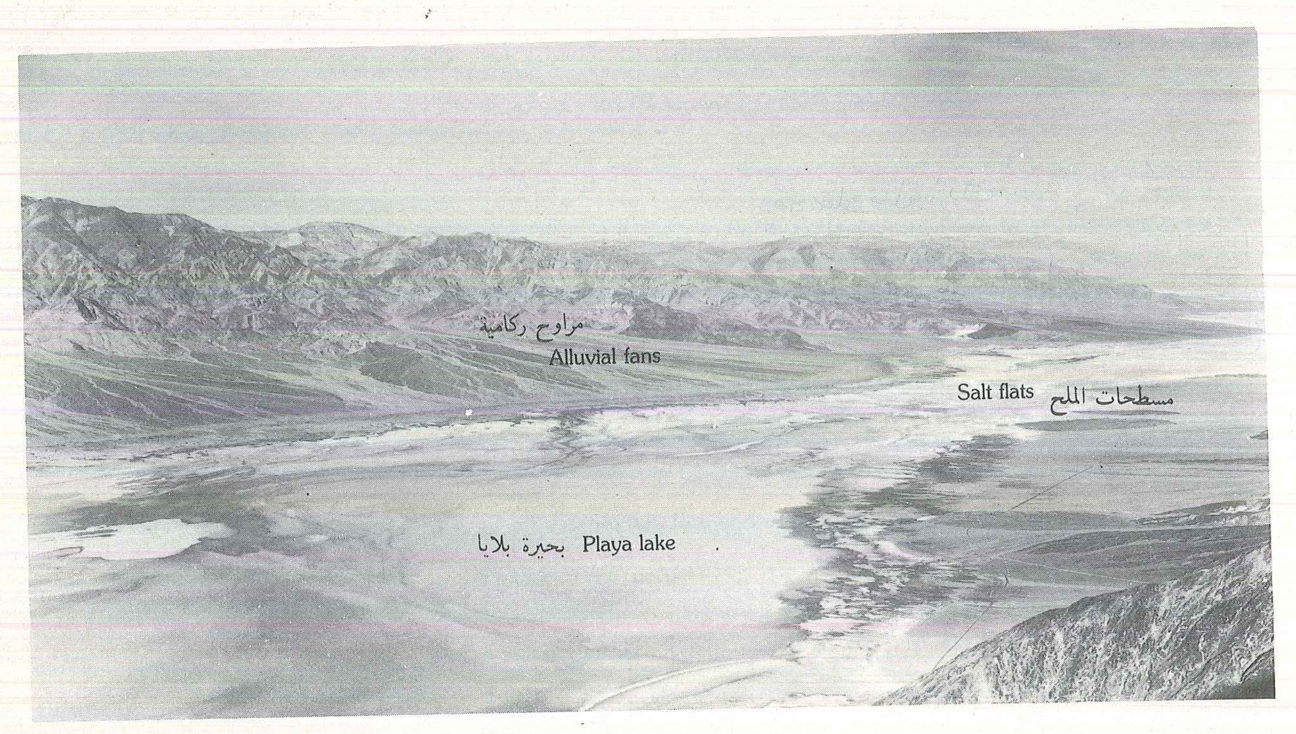
أ



ب

شكل 12 ـ 16

(أ) ـ منظر جوى لمراوح ركامية بوادى الموت بكاليفورنيا. يعتمد حجم المروحة على حجم حوض صرف المياه. وبنمو هذه المراوح واندماجها تتكون البجادا. (ب) ـ خريطة تبين مراوح غرينية بكاليفورنيا.



شكل 12 ـ 17

البلايا بحيرة منبسطة وجافة. تتكون بها بحيرة بلايا مؤقتة بعد هطول الامطار أو ذوبان الثلج من الجبال المجاورة. تترسب الاملاح فى هذه البحيرة بعد بخر مياهها.

أسئلة للمراجعة :

1 ـ تتكون معظم الصحارى من مساحات شاسعة من الكثبان الرملية . اذكر مدى صحة هذه العبارة مع بعض الأمثلة لتفنيد اجابتك .

2 ـ ما هو اتساع الصحارى والسهول حول الكرة الأرضية؟

3 ـ ما هو السبب الرئيسى وراء تكون الصحارى الشبه قارية؟ الصحارى متوسطة البعد عن خط الاستواء؟

4 ـ فى أى من نصف الكرة الأرضية (الشمال أو الجنوب) تعتبر الصحارى المتوسطة البعد عن خط الاستواء أكثر انتشارا؟

5 ـ لماذا تكون تعرية الصخور بالصحارى محدودة؟

6 ـ ما هى أكثر عوامل التعرية تأثيرا فى الصحارى؟

7 ـ بماذا تتميز الوديان الصحراوية؟

8 ـ صف طريقة نقل الرمال بواسطة الرياح . الى أى ارتفاع يمكن أن تصل الرمال المنقولة برياح قوية؟

9 ـ لماذا تعتبر الرياح أهم نسبيا كعامل تعرية بالمناطق الجافة منه فى المناطق الممطرة؟

10 ـ ما هو العامل الذى يحد من عمق بقع النفخ؟

11 ـ كيف تهاجر الكثبان الرملية؟

12 ـ هناك أربعة أنواع من الكثبان الرملية . أذكر نوع الكثبان فى كل من الحالات التالية :

(أ) ـ تعرف فى بعض الأحيان بكثبان السيف .

(ب) ـ الكثبان التى تشير رؤ وسها الى عكس اتجاه الريح .

(جـ) ـ روابى رملية طويلة تأخذ اتجاها عموديا على اتجاه الرياح .

(ء) ـ تتواجد غالبا فى المناطق الساحلية حيث يكوّن الريح بقع النفخ .

(هـ) ـ كثبان وحيدة تشير رؤ وسها الى اتجاه الريح .

(و) ـ كثبان رملية طويلة تأخذ اتجاهاً موازياً تقريبا لاتجاه الريح .

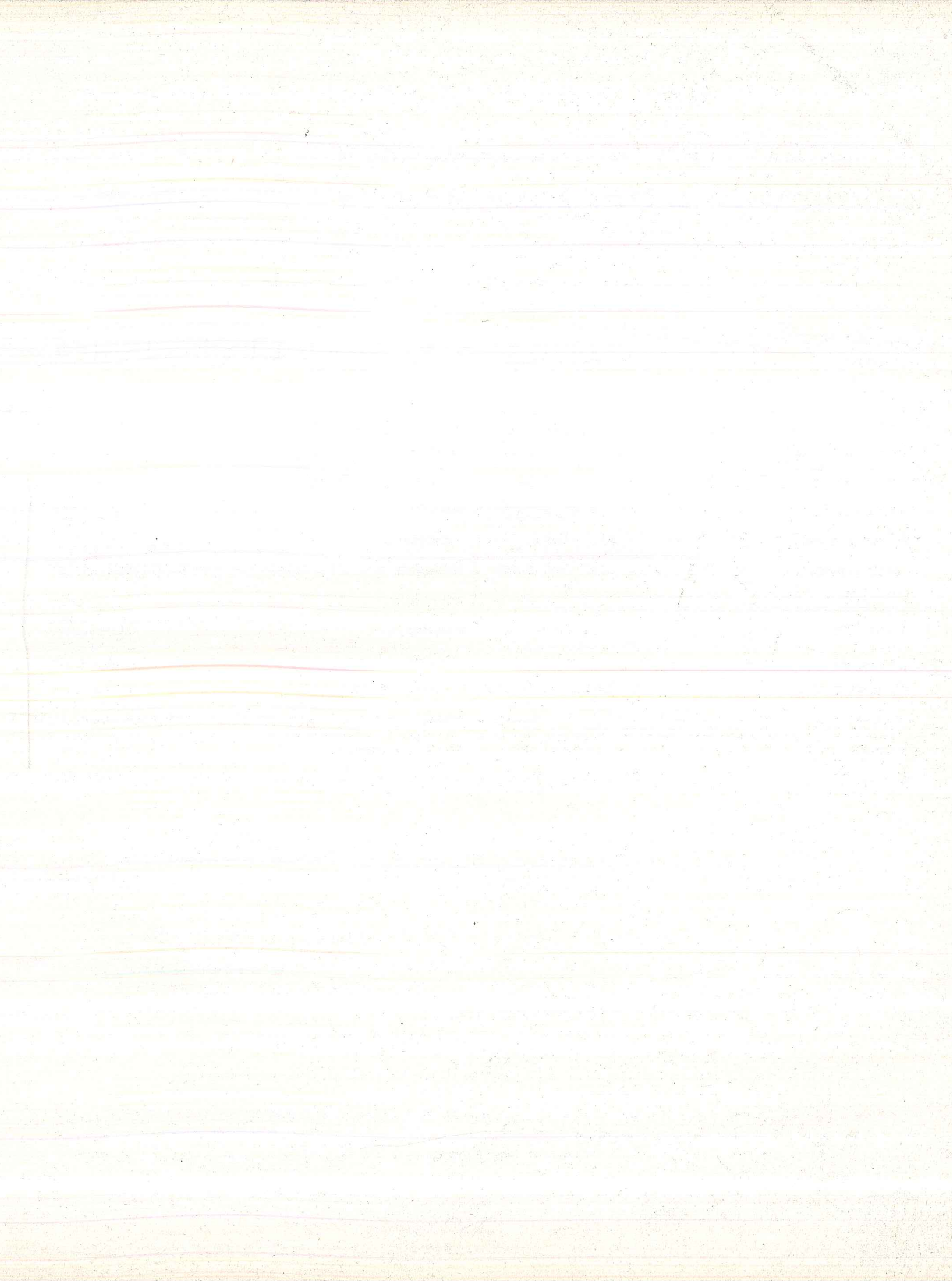
13 ـ بالرغم من أن الكثبان الرملية اكثر رسوبيات الرياح شهرة فإن الراسب الغرينى ذا أهمية كبيرة فى بعض المناطق . ما هو الراسب الغرينى؟ وأين يوجد؟ وما هو منشأه؟

14 ـ لماذا لا يعتبر مستوى سطح البحر عاملا مؤثرا فى التعرية بالمناطق الصحراوية؟

15 ـ صف أشكال وخصائص كل من مراحل تطور الصحراء الجبلية مقدما أمثلة عن كل مرحلة.

الكلمات الدالة :

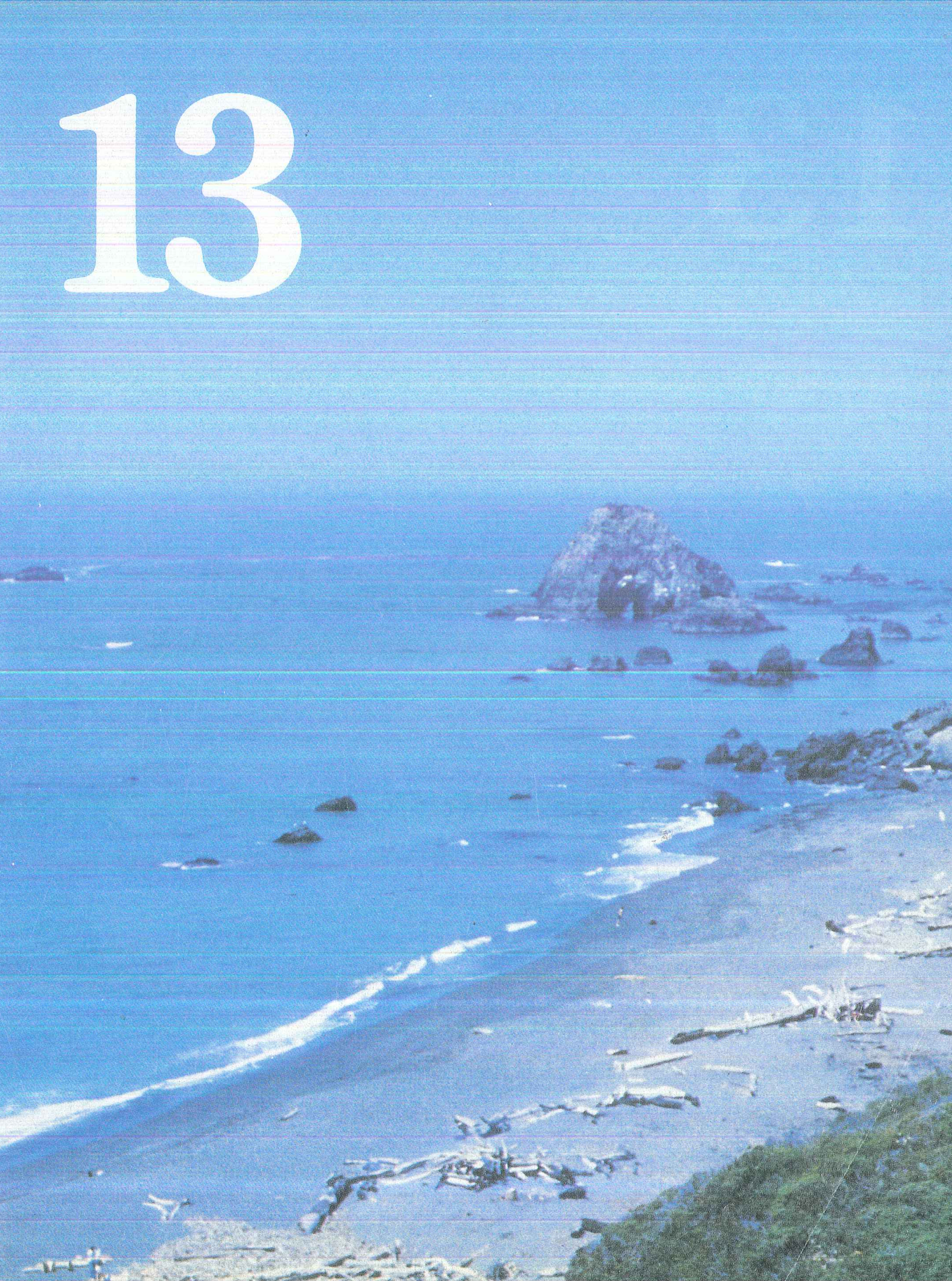
بحيرة بلايا	playa lake
بجادا	bajada
بقع النفخ	blowout
بلايا	playa
مشغولات الصحراء	ventifact
تعرية بالانكماش	deflation
جافوف	xerophyte
جزيرة جبلية	inselberge
حمولة أرضية	bed load
حمولة معلقة	suspended load
رسوبيات الغرين	loess
رصيف الصحراء	desert pavement
طبقات متقاطعة	cross beds
قوصرة	pediment
كثيب رملى	dune
كثيب طولى (كثيب السيف)	longitudinal dune
كثيب مستعرض	transverse dune
كثيب قطاع مكافىء	parabolic dune
كثيب هلالى	barchan dune
كشط	abrasionn
مروحة ركامية	alluvial fan
مناخ جاف	dry climate
نظام صرف داخلى	interior drainage
وثب	saltation
وجهة الانزلاق	slip face



13



الشـواطـىء


13

الأمواج

تعرية الأمواج

انحراف الأمواج

الجرف الشاطئى والتيارات الشاطئية

تدخل الانسان فى العمليات المؤثرة فى الشواطىء

معالم الشواطىء

الشواطىء المغمورة

السواحل المنبثقة والمغمورة

المد والجزر

المد والجزر ودوران الأرض

المد والجزروتوليد الطاقة

الماء بالبحار والمحيطات فى حركة دائمة. ويمكن للمشاهد ملاحظة حركتى المد والجزر على الشواطىء مع قدوم الأمواج وانكسارها، والتى قد تكون منخفضة وهادئة أو قد تضرب الشواطىء بقوة وعنف. وتعد الشواطىء مواقع للتداخل الحركى بين الأرض والبحر وخير دليل على إستمرار حركة مياه المحيطات والبحار. فالشواطىء فى حركة تشكُّل وتغيرٌ مستمرة تحت وطأة الأمواج. غير أن ذلك لا يكون واضحا فى نظرة عابرة. فهى فى يومنا هذا ليست فقط نتاج هجمات أمواج البحر المتتالية على اليابسة فحسب بل هى أيضا نطاق معقد ومميز لعمليات جيولوجية متعددة. فمثلا جميع الشواطىء قد تأثرت بارتفاع مستوى سطح البحر الناتج عن ذوبان الجليد بنهاية عصر البليستوسين. ومع تقدم البحر شيئا فشيئا تجاه اليابسة تكونت الشواطىء فوق ما سبقها من مميزات تضاريسية ناتجة عن عوامل جيولوجية عدة، مثال تعرية الأنهار والتجلد والنشاط البركانى مع حركة بناء الجبال.

تعرية الأمواج تعمل على استقامة الشواطىء غير المنتظمة.

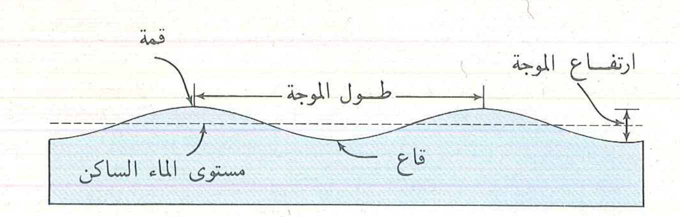
الأمواج

تعتبر الرياح مصدر الطاقة الرئيسى الذى يشكل ويعدل فى الشواطىء عن طريق الأمواج. فالأمواج المنتقلة مسافات تبلغ المئات أو آلاف من الكيلومترات تجد فجأة ما يعترضها عن التقدم عند التقاء الماء باليابسة. وبعبارة أخرى فإن الشواطىء تمثل مواقع تصادم قوة لا تقاوم مع جسم لا يتحرك.

وتسمى تموجات سطح البحر بالأمواج. وهى تستمد طاقتها من الرياح فعند حركة الريح بسرعة قد لا تصل الى 3 كيلومترات فى الساعة تحدث فى الحال أمواج صغيرة لا تلبث أن تختفى بهدوء الريح وبالسرعة التى تكونت بها. وعند زيادة السرعة عن 3 كيلومترات فى الساعة تتكون أمواج اكبر متقدمة فى اتجاه الرياح.

وتوصف الأمواج بمميزات موضحة فى الشكل 13 ـ 1 . فنهاياتها العلوية تسمى قمم يفصل بين كل قمتين متجاورتين ما يسمى **بالقاع**. ويطلق على المسافة العمودية بين القمة والقاع **بإرتفاع الموجة**. أما المسافة الأفقية بين قمتين متتاليتين فتسمى **طول الموجة**. **وزمن الموجة** هو الوقت اللازم لمرور قمتين متتاليتين بنقطة ثابتة. ويعتمد ارتفاع الموجة وطولها وزمنها على ثلاثة عوامل: (1) سرعة الرياح. (2) مدة هبوب الريح. (3) الجهد أو المسافة التى انتقلها الريح عبر جسم مائى مفتوح. وكلما زاد تحول الطاقة من الرياح الى الماء كلما ازداد ارتفاع الموجة الناقلة له. وفى المحيطات المفتوحة تعتبر الموجات ذات الارتفاع الذى يتراوح بين المتر والأربعة أمتار مألوفة جدا. غير أن العواصف قد تنتج أمواجا أعتى من هذه بكثير.

وحيث أن الرياح غالبا ما تكون مضطربة فإن ذلك ينعكس على أمواجها التى تكون غير منتظمة الارتفاع والطول. وعند توقف هبوب الرياح أو تغيرّ اتجاهها. أو عند مغادرة الأمواج لمكان العاصفة تستمر الأمواج بغض النظر



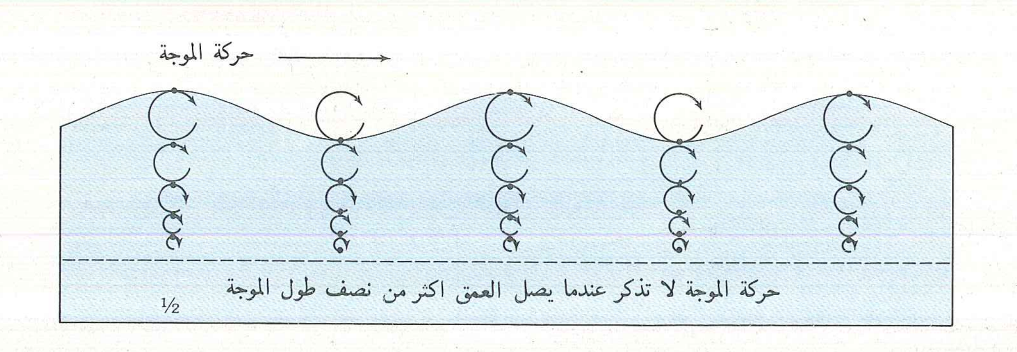
شكل 13 ـ 1
أبعاد الموجة ووصفها.

عن موقع تكونها. وتتغير الأمواج تدريجيا وهى تغادر موقع تكونها حيث تعلو الأمواج المرتفعة الأقل منها طولا وارتفاعا وربما تنقل طاقة العاصفة الى أن تصل بها الى الشواطىء البعيدة. ولكون الأمواج عبارة عن خليط من عدة أنواع تكونت تحت مؤثرات مختلفة ثم تواجدت مجتمعة فى وقت واحد فإن سطح البحر يعكس أشكالا معقدة وغير منتظمة. والأمواج التى نشاهدها عند الشواطىء هى خليط من أمواج أتت من مسافات بعيدة وأخرى تكونت محليا.

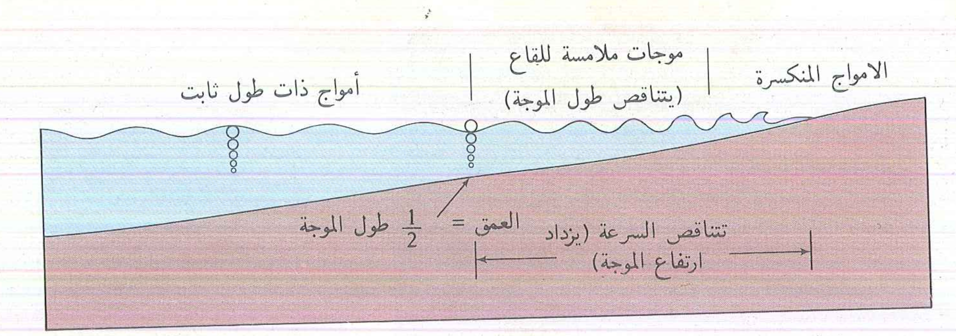
وفى البحار المفتوحة تختلف حركة الأمواج عن حركة جزيئات الماء بداخلها، حيث أن الحركة الى الأمام تقتصر على شكل الموجة دون الماء. فجزيئات الماء تتحرك فى دوائر أثناء مرور الموجات (شكل 13 ـ 2). وبعد ذلك ترجع الجزيئات تقريبا الى سابق مواقعها الأصلية. ويمكن تفهم ذلك بمشاهدة قطعة عائمة من الفلين عند مرور موجة بها. فقطعة الفلين ترتفع متمايلة الى فوق وتحت دون تقدم يذكر. وعليه تسمى موجات البحار المفتوحة بموجات **التذبذب**.

وتعمل الرياح على جر الماء قليلا الى الأمام مسببة فى دورة المياه السطحية بالمحيطات. غير أن الطاقة الهوائية لا يقتصر تأثيرها على سطح الماء بل يمتد كذلك الى ما تحته. ونتيجة لعامل الاحتكاك فإن قدرة هذه الطاقة المؤثرة تتناقص بزيادة عمق الماء الى ما يقارب نصف طول الموجة، حيث تكون حركة جزيئات الماء لا تذكر. ويوضح هذا التناقص السريع فى أقطار مدارات جزيئات الماء بالشكل 13 ـ 2.

وتتأثر الموجات بمغادرتها الأعماق الكبيرة من الماء واقترابها من الشاطىء حيث تكون المياه ضحلة. وتلامس الموجة القاع عندما يصبح عمق الماء يساوى نصف طولها، وعندما تتناقص حركتها لاستعمال جزء من طاقتها فى تحريك جزيئات الرسوبيات بالقاع الى الأمام والخلف. ومع تقدم الموجات تجاه الشاطىء تلحق السريعة منها بالتى سبقتها مسببة فى نقصان طولها. وبتناقص سرعة الموجة وطولها تزداد ارتفاعا الى أن تصل نقطة حرجة حيث لا تستطيع مقدمة الموجة الشديدة الانحدار على إسنادها وبالتالى تنهار أو تتكسر (شكل 13 ـ 3). وتصبح الموجة عند هذا الحد **موجة نقل** حيث تنقل الماء متحركا تجاه الشاطىء. ويسمى الماء المضطرب الناتج عن إنهيار الموجات عند الشاطىء بالأمواج المنكسرة. ويلى اندفاع الماء على الساحل تراجعه تجاه البحر مرّة أخرى فى تشكيل معقد. ومع تقدم مياه البحر السطحية تجاه الشاطىء تتجه مياه الأمواج المستهلكة الى عرض البحر منتشرة على مساحة كبيرة أو فى



شكل 13 ـ 2
حركة جزيئات الماء بمرور الأمواج.



شكل 13 ـ 3
التغيرات التي تحدث للموجة عند تحركها الى الشاطىء.

قنوات محصورة وضيقة قد تسبب فى جرِّ السابحين الى الأعماق عندما تكون قوية.

تعرية الأمواج

يصل فعل الأمواج حده الأدنى عند فترات الهدوء. وكما تقوم الأنهار بمعظم نشاطها اثناء الفيضانات فإن الأمواج تنشط كذلك أثناء العواصف البحرية. فقد تدفع كل موجة منكسرة بآلاف الأطنان من الماء على اليابسة. فمثلا يصل معدل ضغط موجات المحيط الأطلسى الى 10,000 كيلوجرام لكل متر مربع خلال فصل الشتاء. وتزيد هذه القوة أثناء العواصف. فقد نقلت الأمواج تجاه الشاطىء كتلة تزن 1350 طنا من الحديد والخرسانة بعد تمزيق كاسر للأمواج بخليج ويك باسكتلندا. وبعد خمس سنوات واجهت نفس المصير كتلة أخرى تزن 2600 طن كانت قد وضعت محل الأولى. وهناك أمثلة كثيرة على قدرة الأمواج المنكسرة على الشواطىء. فلا غرْوَ أن نلاحظ التشققات والتصدعات التى سرعان ما تظهر بالأجرف والاسوار البحرية وكاسرات الأمواج وغيرها من التى تتعرض لهذه الصدمات الهائلة. فبدفع الماء الى كل فتحة تجعل الهواء بها تحت قوة ضغط كبيرة كافية لخلع الكتل الصخرية أو زيادة اتساع التشققات السابقة. والمنافذ الهوائية التى توجد ببعض الشواطىء ذات الأجرف مثال على قوة الأمواج الرهيبة (شكل 13 ـ 4). فأثناء العواصف يندفع الماء والهواء خلال الفتحات المواجهة للبحر لتندفع فيما بعد على السطح فى عمود مائى تصحبه أصوات تشابه أصوات الحمّـات المتفجرة.

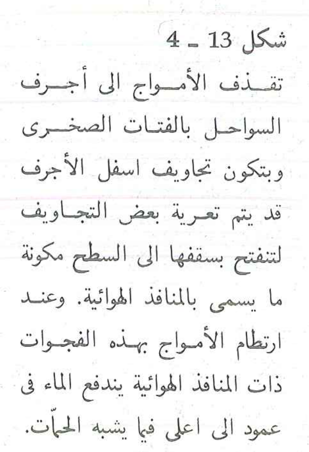
والى جانب التعرية عن طريق الاصطدام المباشر أو قوة الضغط تعمل الأمواج على **كشط** أى القطع والطحن، تحت تأثير الماء الممزوج بقطع الصخور. وقد يكون الكشط اكثر فعالية فى نطاق الأمواج المنكسرة منه فى الأماكن الأخرى. وتذكرنا دائما الأحجار والحصى المستديرة على الشاطىء بتأثير طحن الصخور بعضها ببعض عند نطاق الأمواج المنكسرة، زد على ذلك أن الأمواج تستعملها كمعاول للتعرية فى الاتجاه الافقى (شكل 13 ـ 5).

ومعدل التعرية فى الشواطىء المكونة من مواد متماسكة أعلى بكثير منه فى الشواطىء الصخرية الصلدة. ففى مناطق من بريطانيا حيث الشواطىء تتكون من رسوبيات جليدية رملية وحصى وطين عملت التعرية على تقهقر الشاطىء مسافة تتراوح بين 5.3 كيلومترات من موقعه إبان العهد الرومانى مكتسحة الكثير من القرى والمواقع الأثرية الأخرى. وأجرف رأس كود هى مثال آخر على ذلك حيث أن معدل تراجع موقع الشاطىء قد بلغ مترا فى السنة.

إنحراف الأمواج

تتقدم معظم الأمواج من الشاطىء فى اتجاه عمودى. غير أنها عند وصولها الى المياه الضحلة حيث يكون القاع طفيف الانحدار يتغير اتجاهها الى موازاة الشاطىء. ويعرف هذا التغير فى الاتجاه **بانحراف الأمواج** (شكل 13 ـ 6). وطرف الموجات القريب من الشاطىء يصل الى القاع أولا، وتقل سرعته بينما يستمر الطرف الثانى فى تقدمه بنفس معدل





شكل 13 ـ 4

تقـذف الأمـواج الى أجـرف السواحـل بالفتـات الصخـرى وبتكون تجاويف اسفل الأجرف قد يتم تعرية بعض التجـاويف لتنفتح بسقفها الى السطح مكونة ما يسمى بالمنافذ الهوائية. وعنـد ارتطام الأمـواج بهـذه الفجـوات ذات المنافذ الهوائية يندفع الماء فى عمود الى اعلى فيما يشبه الحمّات.



شكل 13 ـ 5

قطع من تحت أحد الأجرف بفعل تعرية الأمواج بالمكسيك.

سرعته. وتكون المحصلة فى النهاية موجات موازية تقريبا للشاطىء بغض النظر عن اتجاهها الأصلى.

وبسبب عامل انحراف الأمواج فإن تأثيرها يكون أكثر تركيزا على المواقع البارزة من الشواطىء تجاه الماء وأقل منه بكثير فى الخلجان. والشكل 13 ـ 8 يوضح التأثير المميز على مواقع الشواطىء غير المنتظمة. وحيث أن الأمواج تصل المياه الضحلة أولا، أمام أَلْسِنَةِ البحر أو الرؤوس البارزة قبل الخلجان المجاورة، فإنها تميل فى محاذاته وتتقدم منه فى اتجاه موازٍ له من ثلاثة اتجاهات. ومع مرور الوقت يعمل هذا على تسوية الشواطىء غير المستوية.

الجرف الشاطئى والتيارات الشاطئية

بالرغم من انحراف الأمواج فإن معظمها يصل الشواطىء فى اتجاه قريب من العمودى. وبالتالى فإن الماء



شكل 13 ـ 6

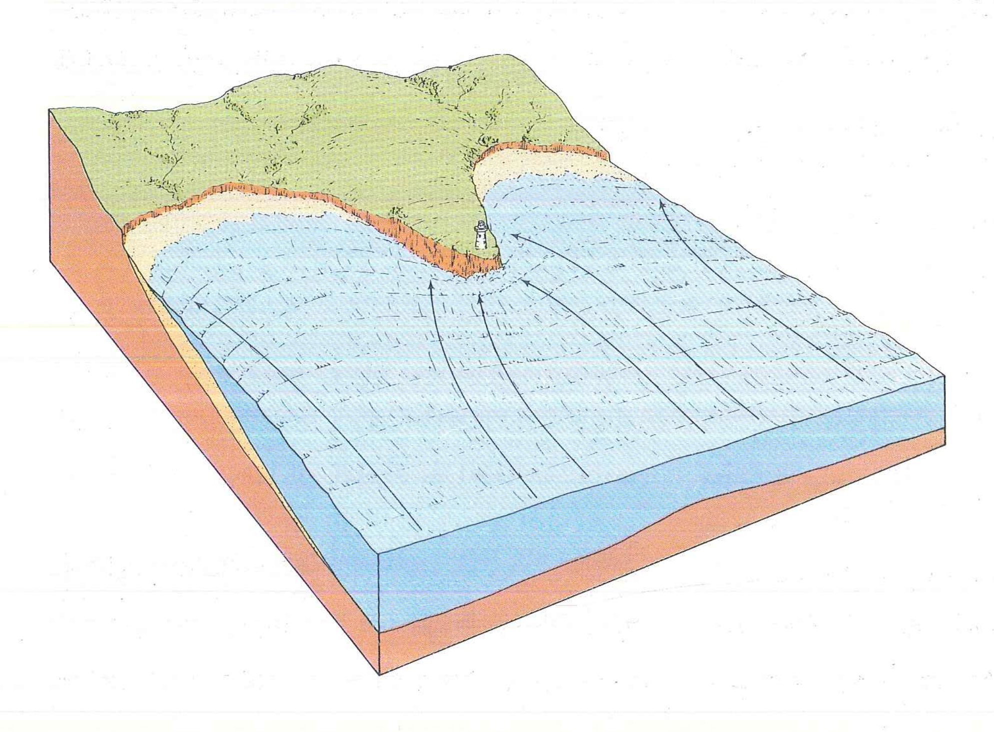
كان هذا البيت الصغير على الشاطىء فى مأمن من خطر الأمواج غير انه بتراجع الشاطىء تم تعرض هذا البيت الى قوة الأمواج الضاربة.

المندفع من كل موجة منكسرة يكون فى اتجاه مائل. غير أن المياه فى طريق عودتها الى البحر تأخذ اتجاها مستقيما مع الانحدار. ويعمل هذا على نقل الرسوبيات فى اتجاه متعرج على طول الساحل (شكل 13 ـ 9). وتعرف هذه الحركة **بِالْجَرْفْ الشاطئى**، وقد يعمل هذا على نقل حبيبات الرمل والحصى مئات وأحيانا آلاف الأمتار يوميا.

وتعمل الموجات المائلة كذلك على احداث تيارات بنطاق الأمواج المنكسرة مواز للشاطىء. وحيث أن الماء مضطرب هنا فإن هذه **التيارات الشاطئية** يمكنها نقل حبيبات الرمل الدقيقة المعلقة بالاضافة الى دحرجة الحبيبات الاكبر حجما على القاع. وعند إضافة كمية الرسوبيات المنقولة بواسطة التيارات الشاطئية الى تلك

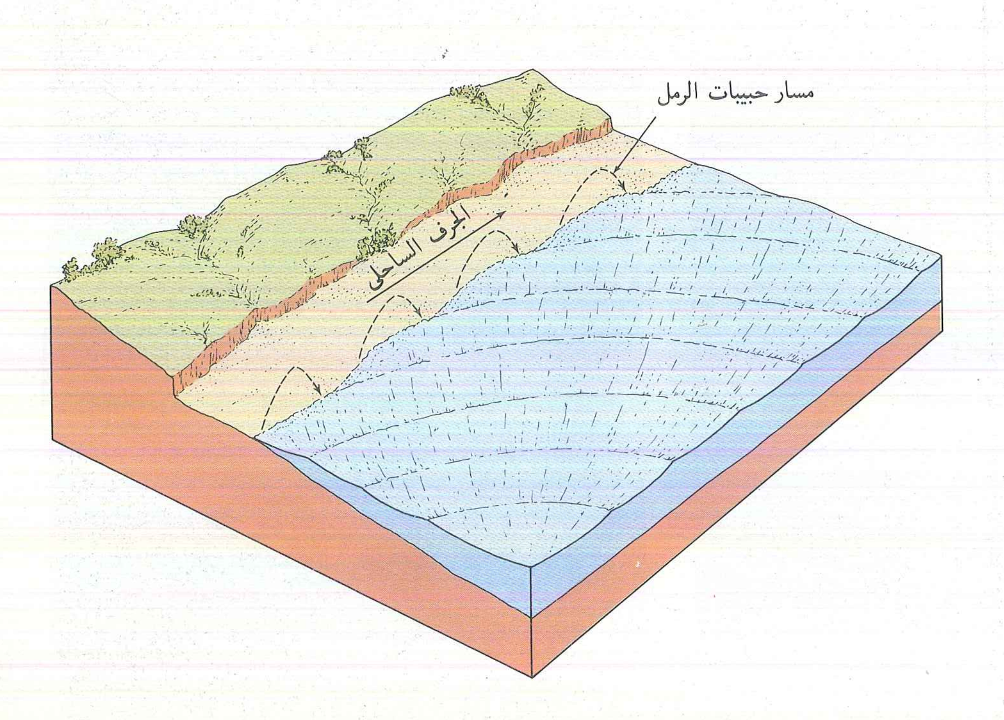
شكل 13 ـ 7

انثناء الأمواج حول نهاية أحد الشواطىء.



شكل 13 ـ 8

إنكسار الامواج على شاطىء غير منتظم.



شكل 13 ـ 9

الجرف الساحلى يسببه اندفاع الماء من الأمواج المائلة.

المنقولة عن طريق الجرف نجد أنها لا يستهان بها. فقد وجد مثلا فى منطقة ساندى هوك بنيوجرسى أن الكمية المنقولة لمدة 48 سنة وصلت الى معدل يقارب 750,000 طن فى السنة. وفى أوكسنارد بكاليفورنيا تنقل بهذه الطريقة اكثر من 1.5 مليون طن من الرسوبيات على طول الشاطىء سنويا.

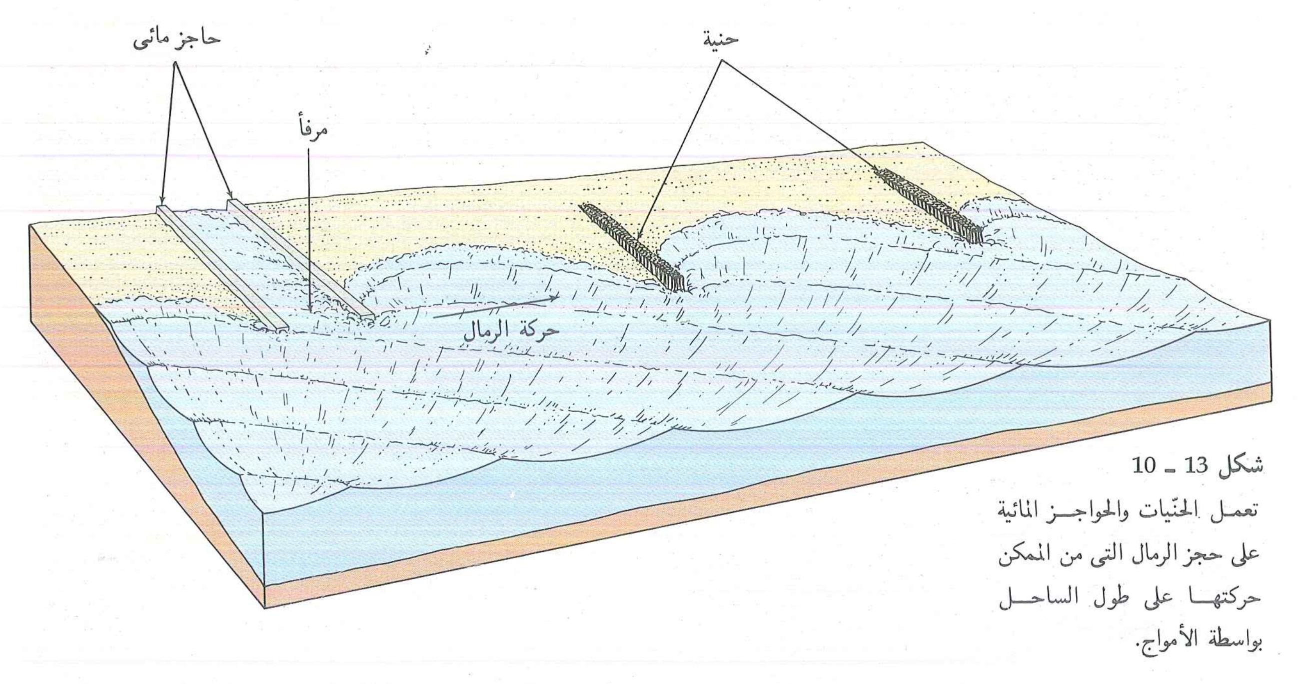
وقد لا يكون مصدرا للاستغراب تسمية الشواطىء بأنهار الرمال. ففى أى نقطة منها تزيد كمية الرسوبيات ذات المنشأ البعيد عن تلك المشتقة من المرتفع ورائها. ويلاحظ أن كثيراً من رسوبيات الشواطىء ليست مشتقة من تعرية الأمواج بل انها أتت بفعل الأنهار التى تصب فى المحيطات والتى تعتبر مصدرا رئيسيا لها. وعليه لولا عامل نقل الرسوبيات بواسطة الجرف وتيارات الشواطىء لكانت كثير من الشواطىء تفتقر الى الرمال.

تدخل الانسان فى العمليات المؤثرة فى الشواطىء

تسبب حركة الرمال بواسطة الجرف وتيارات الشواطىء مشاكل عديدة. فالرمال قد تنقل من أماكن يرغب الانسان بقائها بها وقد تنقل الى اماكن غير مرغوب فيها. وتعالج هذه المشاكل ببناء حواجز مائية وكاسرات أمواج. وقد تنتج بعض المشاكل عن تدخل الانسان نفسه فى عمليات الطبيعة الساحلية ووقف حركة الرمال غير المرغوب فيها والتى قد تكلف الكثير لتصحيحها.

وتبنى **الحواجز المائية** فى أزواج ممتدة فى المحيط عند مداخل الأنهار والموانىء وذلك لحصر تيار الماء الناتج عن المد والجزر فى قناة ضيقة تاركة الرمل فى حركة دائمة بها لمنعه من الترسب داخلها. غير أن هذه الحواجز كما هو موضح بالشكل 13 ـ 10 قد تقف سدا أمام الرمال المتحركة بالـجَرْف وتيارات السواحل مؤديا ذلك الى تراكمها عندها. كما تعمل الأمواج على ازالة الرمال عند الناحية المقابلة. وحيث أنها لا تستقبل أية رسوبيات رملية جديدة فسيختفى الشاطىء الرملى كليا عند ذلك الموقع.

وللمحافظة أو لزيادة عرض الشواطىء التى تفقد رمالها بفعل الجرف أو تيارات السواحل يعمد الى بناء **الحنيَّات** وهى جدران قصيرة تبنى عموديا على الساحل لحجز الرمال



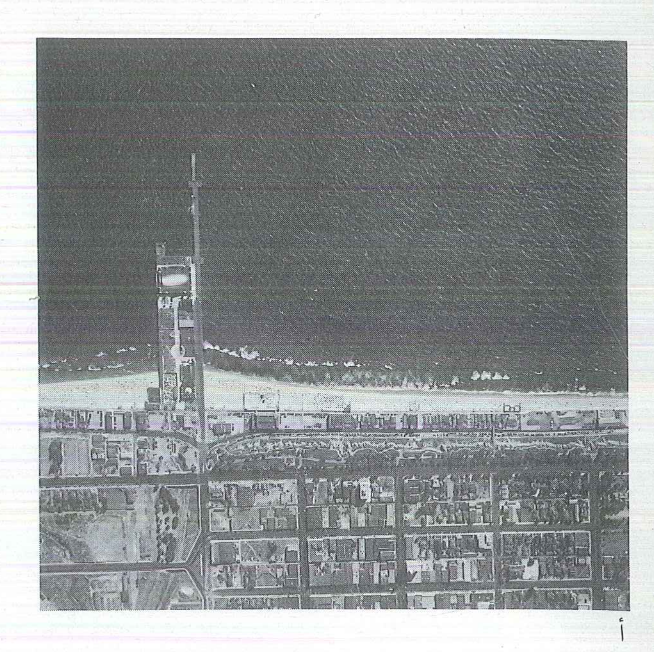
شكل 13 ـ 10

تعمل الحنّيات والحواجز المائية على حجز الرمال التى من الممكن حركتها على طول الساحل بواسطة الأمواج.

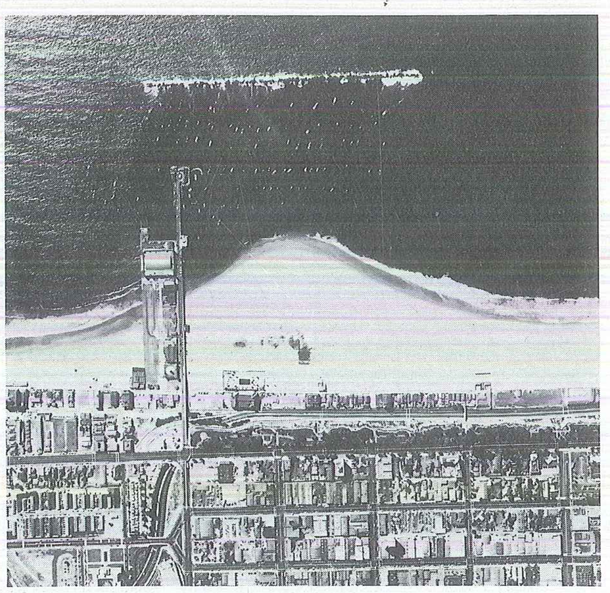
المتحركة (شكل 13 ـ 10). وحيث أن الحنيَّات تؤدى عملها بفاعلية كبيرة فإن التيارات الساحلية ورائها والتى تفتقر الى حمولة رملية تعمل على نقل الرمال الموجودة هناك مما يثير إحتجاج أصحابها. ولموازنة هذا الاجراء يقوم هؤلاء ببناء حنيَّات على شواطئهم مما يضاعف من أعداد الحنيَّات كما هو الحال عليه بشاطىء نيوجرسى، حيث تم بناء ما يقارب الثلاثمائة حنيَّة. وحيث أن هذه الطريقة أثبتت عدم جدواها فى تقديم حل مناسب طويل المدى لمشكلة التعرية بالشواطىء فقد تم استحداث طريقة أخرى تعرف **بانعاش الشواطىء**. وهى عبارة عن زيادة الرمال الى الشواطىء من آن الى آخر. وقد يكون مصدر الرمال قاع هور مجاور أو كثبان رملية على اليابسة. وقد ينقل الرمل مباشرة بواسطة الشاحنات الى الشواطىء أو يصب فى موقع ويترك أمر توزيعه الى نشاط الأمواج. ويجب التنويه هنا الى أن عملية الانعاش قد تكون حلا باهظ التكاليف ومثال ذلك تكلفة انعاش 24 كم من شاطىء ميامى بأمريكا والتى بلغت 64 مليون دولار. وبالاضافة الى ذلك قد ينتج عن عملية الانعاش تأثيرات بيئية غير مرغوب فيها مثل ما حدث على شاطىء وايكيتى بهاوائى حيث تم استبدال الرمال الكلسية بأخرى ذات محتوى طينى اكبر مما زاد فى قدرة الأمواج على تعرية الشاطىء الأقل مقاومة وبالتالى تعكر الماء ومن ثمَّ قتل الشعب المرجانية القريبة. وقد سبب كذلك استبدال رمال شاطىء ميامى المكونة من حبيبات الكوارتز بأخرى كلسية التكوين فى الحاق الضرر بمستعمرات الشعب المرجانية فى المنطقة.

ولاستحداث مياه هادئة لحماية القوارب من الأمواج العاتية يقام **حائل أمواج** موازٍ للشاطىء. غير أن قلة نشاط الأمواج خلف الحاجز قد يترتب عليها بداية تراكم الرمال مما يؤدى الى ملء المرفأ فى تزامن مع تعرية الجزء الآخر من الشاطئء. فمثلا فى سانتا مونيكا بكاليفورنيا حيث ظهرت هذه المشكلة بعد بناء حائل للأمواج فاضطرت سلطات المدينة الى وضع آلة لرفع الرمال من داخل المياه المحمية ووضعها أمام الجرف وتيار الساحل لتصريفها (شكل 13 ـ 11).

وكما هو واضح من المثال السابق بأن عوامل الشاطىء الطبيعية تتفاعل مع أى تدخل للانسان فى مجراها، وكل اجراء لا يؤخذ فى الاعتبار ما سيترتب عليه فى الجهة الأخرى



أ



ب

شكل 13 ـ 11

(أ) ـ شاطىء سانتا مونيكا سنة 1931 . (ب) ـ نفس الشاطىء سنة 1949 . عمل بناء حاجز الامواج على الاخلال بنظام حركة الرمال ومن ثم تسبب فى نمو الشاطىء تجاه الماء.

من الشاطىء قد تكون نتائجه غير مرضية. فالترسيب فى مكان ما يؤدى الى التعرية فى مكان آخر وبالتالى اعادة رسم شكل الشاطىء.

وفى بعض الأحيان قد تحدث تغيرات جذرية بالشاطىء إثر نشاط بشرى فى مناطق بعيدة عن ذلك المكان. فكما ذكرنا تعتبر الأنهار مصدراً رئيسياً لرمال الشواطىء. وتقوم الأمواج بنقل وتوزيع هذه الرسوبيات بواسطة الجرف والتيارات الساحلية. وفى حالة إقامة حاجز أو سد على النهر فإن الرسوبيات التى كان النهر يلقى بها الى البحر ستترسب خلف السد. وحيث أن نشاط الأمواج مستمر على الشاطىء دون زيادة رمال فسينجم عن ذلك اختفاء رمال الشاطىء كليا.

معالم الشواطىء

تتكون **أجرف قطع الأمواج**، كما تدل تسميتها، بقطع قاعدة اليابسة بفعل الأمواج المنكسرة. ومع تقدم التعرية تتهاوى الأجزاء التى بقيت بارزة بعد نقل ما تستند اليه من رسوبيات. وهكذا يتراجع الجرف عن موقعه (شكل 13ـ5). وتتكون **أرصفة قطع الأمواج** بتراجع الأجرف التى هى نسبيا منبسطة فيما يشابه المنضدة (شكل 13 ـ 12). ويزداد الرصيف إتساعا كلما استمرت الأمواج فى تعريتها. وقد يبقى بعض الحطام الصخرى الناتج عن انكسار الأمواج على حافة الماء كجزء من معالم الشاطىء بينما ينقل الباقى الى داخل البحر.

وبسبب ظاهرة جرف الأمواج فإن الأجزاء البارزة تجاه البحر تتم مهاجمتها بعنف وتكون تعريتها مميزة، حيث يتم نقل الأقل صلابة والأكثر تشققا بمعدل أعلى من البقية. فقد تتكون نتيجة لذلك أولا **كهوف بحرية**. وعند التقاء إثنان من الكهوف البحرية يتكون ما يعرف **بالقوس البحرى**. وبعد تهاوى القوس تبقى بقاياه معزولة داخل الماء على أرصفة قطع الأمواج وتعرف **بالكومة البحرية** (شكل 13 ـ 13). وبالطبع يتم استهلاكها فيما بعد بالأمواج.

شكل 13 ـ 12

ارتفاع ارضية قطع الأمواج بالقرب من سان فرانسيسكو. لاحظ تكون ارضية قطع الأمواج الجديدة عند القاعدة.

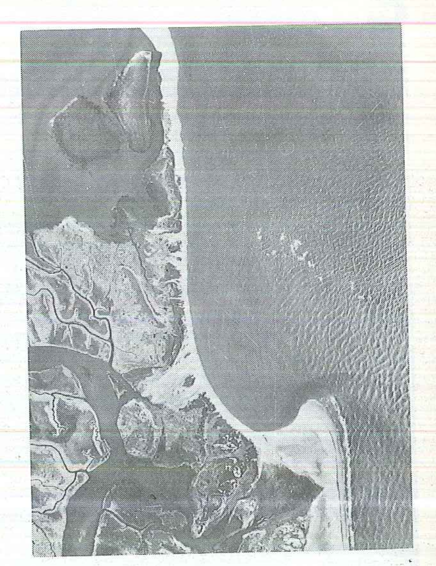
شكل 13 ـ 13

قوس بحرى وكومة بحرية بالقرب من سانتا كروس بكاليفورنيا.

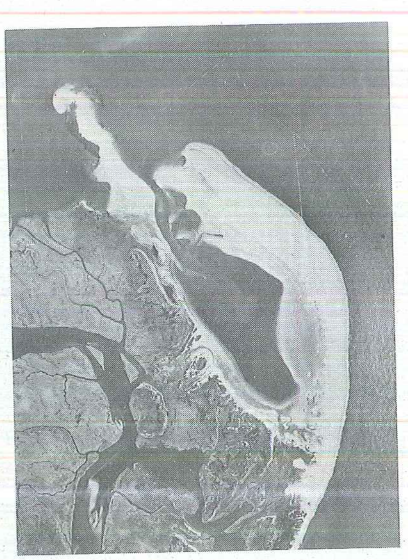
وفى مواقع جرف السواحل وتياراتها تتكون عدة ظواهر لها علاقة بحركة الرسوبيات على طول الشاطىء. فاللسان بروز رملى طويل الشكل يمتد من الأرض فى اتجاه مدخل خليج مجاور (شكل 13 ـ 14). وغالبا ما يكون طرفه ملتويا تجاه اليابسة بفعل تأثير التيارات. وعقبة مداخل الخلجان تسمية للدلالة على حاجز رملى يسد بالكامل مدخل خليج عن البحر (شكل 13 ـ 15 أ). ويمتد هذا عندما تكون التيارات ضعيفة لتسمح بوصول اللسان الى الجهة المقابلة. أما التومبولو فهو سلسلة رملية تصل بين جزيرة واليابسة أو بين جزيرة وأخرى (شكل 13 ـ 15 ب). وهى تشابه عقبة مداخل الخلجان فى طريقة تكوينها.

وسواحل خليج المكسيك الطفيفة الانحدار مع معظم الساحل الشرقى للولايات المتحدة جنوب مدينة نيويورك تتميز بما يسمى بجزر الحواجز. وهى روابى رملية داخل الماء موازية للشاطىء (شكل 13 ـ 16). وعادة ما تكون المياه بالهور بين هذه الجزر والشاطىء هادئة نسبيا، حيث تستعمل فى ابحار المراكب الصغيرة بين نيويورك وفلوريدا لتفادى مياه شمال الأطلسى المضطربة.

ولا يعرف حتى الآن كيف تكونت جزر الحواجز هذه غير انه من المحتمل أن تكون قد تكونت بثلاث طرق أو أكثر. فبعضها قد يكون ألسنة رملية تم حجزها عن اليابسة بفعل تعرية الأمواج أو بارتفاع مستوى الماء بعد انتهاء آخر فترة جليدية. وقد يكون بعضها قد تكوّن بواسطة اضطراب المياه وعمل الأمواج المنكسرة على تكديس الرمل بعد رَفْعِهِ من قاع البحر. وحيث أن مستوى جزر الحواجز فوق مستوى سطح البحر فان أغلب الظن أن يكون تكدس الرمال ناتج عن عصف الأمواج أثناء فترة المد. وأخيرا إقترحت بعض الدراسات بأن أصل جزر الحواجز كثبان رملية تكونت، على



أ



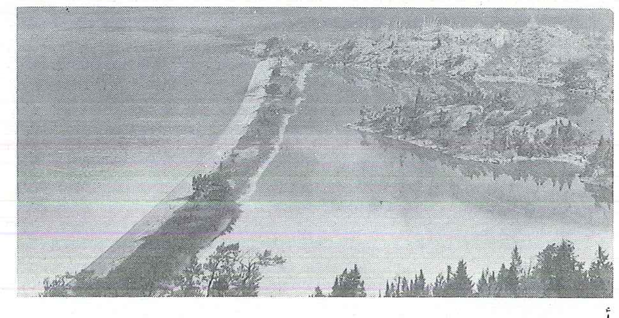
ب



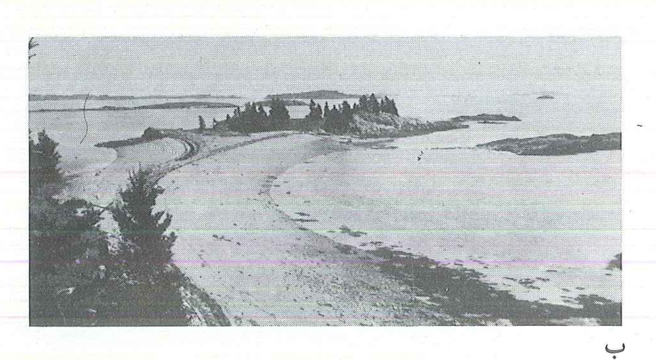
جـ

شكل 13 ـ 14

تبين هذه الصورة الجوية خطوات تكون لسان رملى بنيوجرسى على مدى اكثر من 23 سنة. (أ) ـ بداية تكون اللسان الرملى سنة 1940. (ب) ـ طول اللسان وصل 1600 متر وعرضه 400 متر سنة 1957.
(جـ) ـ وبحلول سنة 1963 نما اللسان المنحنى 300 متر أخرى.



أ



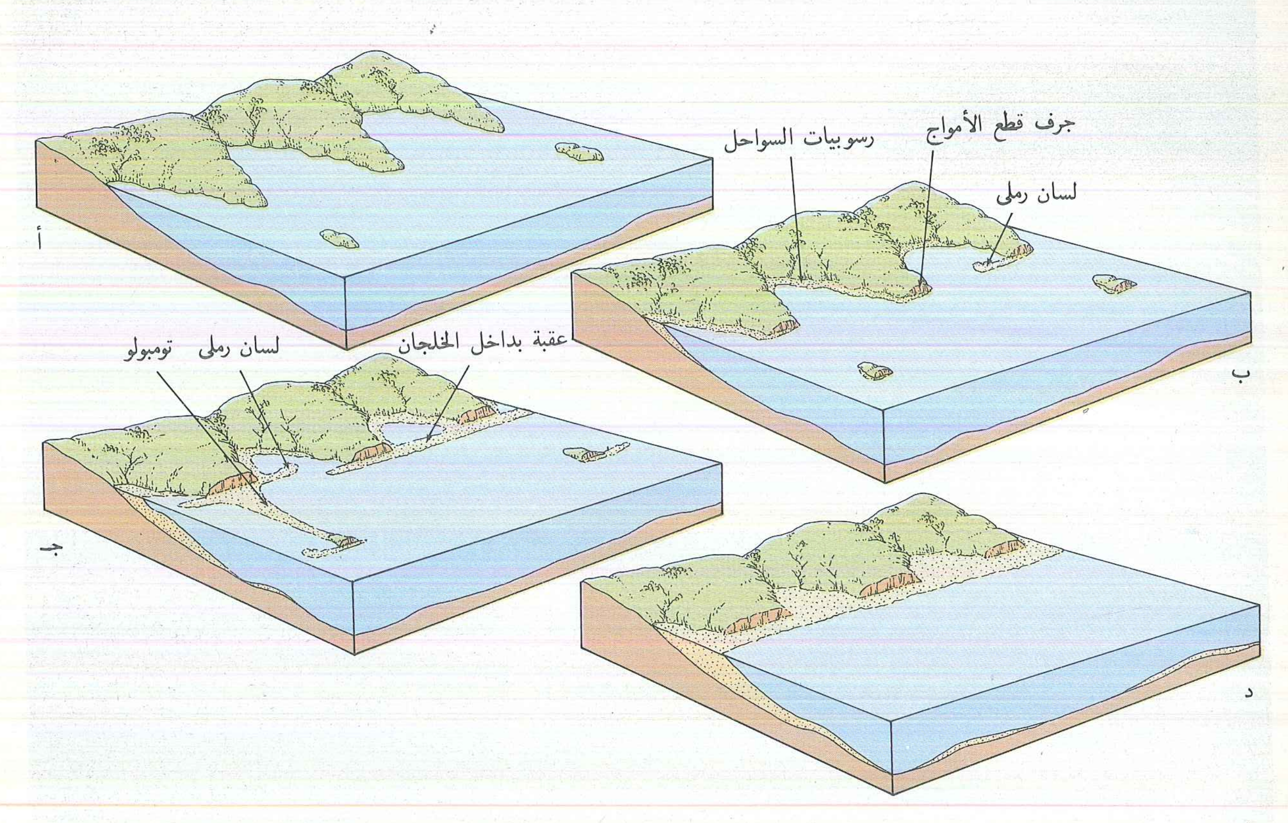
ب

شكل 13 ـ 15

تكونت هذه الظواهر لحركة الرمال بواسطة الجرف الساحلى على طول الشاطىء. (أ) ـ عقبة مداخل الخلجان. (ب) ـ تومبولو.

شكل 13 ـ 16

جزر الحواجز بشمال كاليفورنيا.



شكل 13 ـ 17

تطور نمو شاطىء غير منتظم فى بدايته.

الشاطىء أثناء آخر عصر جليدى تم بعد انتهائه وذوبان الجليد وارتفاع مستوى سطح البحر غرقت المنطقة خلف سلسلة هذه الكثبان الرملية.

ومما لا شك فيه أن الشاطىء يتغير بغض النظر عن شكله الأصلى. ففى البداية تكون الشواطىء عموما غير منتظمة. وتختلف شدة عدم إنتظامها من مكان الى آخر. فالشاطىء ذو التكوينات الجيولوجية المختلفة قد تزيد الأمواج المنكسرة من عدم انتظامه حيث أن الأمواج ستعمل على تعرية الصخور الأقل مقاومة بسهولة مقارنة بالصخور الأكثر مقاومة. غير أنه متفق على أن الشواطىء الثابتة تصبح فى نهاية المطاف أكثر إنتظاما بفعل التعرية والترسيب. ويوضح الشكل 13 ـ 17 تطور شاطىء غير منتظم البداية. وبتعرية الأمواج للأجزاء البارزة مكونة أجرف وأرضيات قطع أمواج تنقل الرسوبيات على طول الشاطىء. وبعض هذه الرسوبيات تتراكم كعقبات بداخل الخلجان أو ألسنة رملية. والبعض الآخر يترسب بالخلجان إضافة الى ما تجلبه الأنهار لينتج فى النهاية شاطىء منتظم.

السواحل المنبثقة والمغمورة

بالنظر الى اختلاف أشكال الشواطىء وكثرة أنواعها يمكننا أن نستنتج أنها أماكن معقدة جيولوجيا. ولتفهم طبيعتها يؤخذ بالحسبان الكثير من العوامل التى تشمل أنواع صخورها، وحجم واتجاه الأمواج، وتكرر العواصف، ومدى المد والجزر، وتضاريس الجزء المغمور تحت الماء والحركات التكتونية، الى جانب تغيّر مستوى سطح البحر.



شكل 13 ـ 18

صورة من القمر الصناعي لجزء من الشاطىء الأمريكي الشرقي يبين خليج شيسابيك الذى تكون بانغمار الشاطىء عند مصب النهر عند ارتفاع مستوى منسوب ماء البحر.

ولتعدد هذه المعطيات فان تقسيم الشواطىء ليس بالامر السهل.

وقد اعتمد الكثير من الجيولوجيين فى تقسيم الشواطىء على تغيرها نسبة الى مستوى سطح البحر. وهذا التقسيم الشائع الاستعمال وغير المتكامل يجعل من الشواطىء نوعان مغمورة ومنبثقة. فالسواحل المنبثقة تتكون اما بارتفاع الشواطىء أو بانخفاض مستوى سطح البحر. أما السواحل المغمورة فان تكونها يكون اما بارتفاع مستوى سطح البحر أو بانخفاض المنطقة المجاورة للبحر.

ففى بعض الأماكن يكون واضحا أن الساحل منبثق حيث أن ارتفاع اليابسة أو انخفاض مستوى سطح البحر سيبرز أجرف وأرصفة قطع الأمواج. ومنطقة سواحل



شكل 13 ـ 18
صورة من القمر الصناعى لجزء من الشاطىء الأمريكى الشرقى يبين خليج شيسابيك الذى تكون بانغمار الشاطىء عند مصب النهر عند ارتفاع مستوى منسوب ماء البحر.

ولتعدد هذه المعطيات فان تقسيم الشواطىء ليس بالامر السهل.

وقد اعتمد الكثير من الجيولوجيين فى تقسيم الشواطىء على تغيرها نسبة الى مستوى سطح البحر. وهذا التقسيم الشائع الاستعمال وغير المتكامل يجعل من الشواطىء نوعان مغمورة ومنبثقة. فالسواحل المنبثقة تتكون اما بارتفاع الشواطىء أو بانخفاض مستوى سطح البحر. أما السواحل المغمورة فان تكونها يكون اما بارتفاع مستوى سطح البحر أو بانخفاض المنطقة المجاورة للبحر.

ففى بعض الأماكن يكون واضحا أن الساحل منبثق حيث أن ارتفاع اليابسة أو انخفاض مستوى سطح البحر سيبرز أجرف وأرصفة قطع الأمواج. ومنطقة سواحل

كاليفورنيا خير مثال على ذلك، حيث أن اليابسة قد ارتفعت نسبة الى مستوى سطح البحر فى الدهر الجيولوجى الحديث. وتوضح أرصفة قطع الأمواج بالشكل 13 ـ 12 هذه الحالة. ومثلا شواطىء مرتفعات بالوس فيرديس جنوب لوس أنجلوس فتوجد بها سبع مستويات لمدرجات تدل على ارتفاع اليابسة سبع مرات وقد يصبح الرصيف الجارى قطعه بواسطة الأمواج حاليا مدرجا آخر فى حالة رفع اليابسة مرّة أخرى.

وتشكل بعض الأمثلة الأخرى للشواطىء المنبثقة تلك التى كانت مدفونة تحت المجالد. وقد كانت القشرة الأرضية فى هذه الأماكن منخفضة تحت وطأة وزن الجليد. وبعد ذوبانه أخذت ترتد تدريجيا مما ترتب عليه وجود معالم لشواطىء ما قبل التاريخ فوق مستوى سطح البحر بكثير. ومثال ذلك منطقة خليج هدسون بكندا، حيث أن أجزاء منه لا زالت ترتفع بمعدل سنتيمتر واحد كل سنة.

وعلى عكس الأمثلة السابقة تبين بعض الشواطىء الأخرى أدلة قاطعة على إنغمارها. ويلاحظ أن شاطىء الساحل المغمور خلال وقت ليس بالبعيد يتميز بتعاريجه، حيث أن البحر عادة ما يغمر الجزء الأخير من مجرى النهر مبقيا رؤوساً فوق مستوى سطحه تمثل المرتفعات التى كانت تفصل بين المجارى المائية بنهايته. وغالبا ما تسمى مصاب الأنهار المغمورة بالأخوار. وهى تميز الكثير من الشواطىء اليوم مثال خليجى شيزابيك ودلوير على الساحل الغربى الأمريكى (شكل5 13 ـ 18). وكذلك مناظر شاطىء مين وخاصة بالقرب من حديقة أكاديا وهى مثال جيد لشاطىء تم غمره بالمياه مع ارتفاع مستوى سطح البحر عقب العصر الجليدى متحولا الى شاطىء مغمور ومتعرج.

ولبعض الشواطىء تاريخ جيولوجى معقد. فربما تكون قد غمرت وأنبثقت مرّات عديدة نسبة الى مستوى سطح البحر. وفى كل مرّة تبقى فيها بعض من مميزات المرحلة السابقة.

المد والجزر

يعرف المد والجزر بتغيّر مستوى سطح البحر دوريا فى منطقة ما. وقد عرف هذا الارتفاع والانخفاض على طول الشواطىء منذ القدم حيث أنها أسهل حركات البحر مشاهدة (شكل 13 ـ 19). ومع أنهما قد عُرِفَا منذ قرون غير أنه لم يتم تفسيرهما العلمى حتى زمن إسحاق نيوتن الذى استعمل فى ذلك قانون الجاذبية. فقد بينَ نيوتن أن المحيطات تقع بين قوى شد لجسمين. وحيث أن المياه بالمحيطات حرّة الحركة فإنها تتشكل تبعا لذلك. إذن فالمد والجزرهما نتاج قوة جاذبية القمر والى حد ما الشمس المؤثرتين فى الكرة الأرضية.

ولتوضيح كيف يتكون المد والجزر سنفترض أن الأرض كرة فى حركة دوران مستمرة ومغطاة بعمق مائى واحد (شكل 13 ـ 20). وهنا يمكننا ببساطة أن نرى كيف يتكون البروز المائى على سطح هذه الكرة القريب من القمر. وبالاضافة الى ذلك يتكون بروز مائى مماثل على سطح الأرض المعاكس. واكتشف نيوتن أن كلا من البروزين يتكوّن نتيجة لقوة الجاذبية. وهى قوة تتناسب عكسيا مع مربع المسافة بين جسمين اللذين هما الأرض والقمر فى هذه الحالة. وحيث أن الجاذبية تضعف بتزايد المسافة فإن تأثير جاذبية القمر يكون أقوى بقليل على جانب القمر الأقرب منه على الجانب المعاكس. وينتج عن هذا الانجذاب تمدد (استطالة) الأرض. وتحت تأثير هذه القوة نجد أن جسم الأرض الصلب لا يتأثر شكله كثيرا غير أن المحيطات القابلة للحركة نجد أنها تتشكل بصورة كبيرة مما ينتج عنه بروز مائى على جانبيها.

وحيث أن موقع القمر لا يتغير كثيرا بالنسبة الى الأرض فى يوم واحد فإن بروزى الماء يبقيان فى مكانهما بينما تتحرك الأرض من تحتهما. وعليه فإن الأرض ستحمل المشاهد فى أى موقع بالتناوب خلال مياه عميقة ثم مياه ضحلة وهكذا. وعند انتقال المشاهد الى مياه عميقة يتواجد فى منطقة مد،



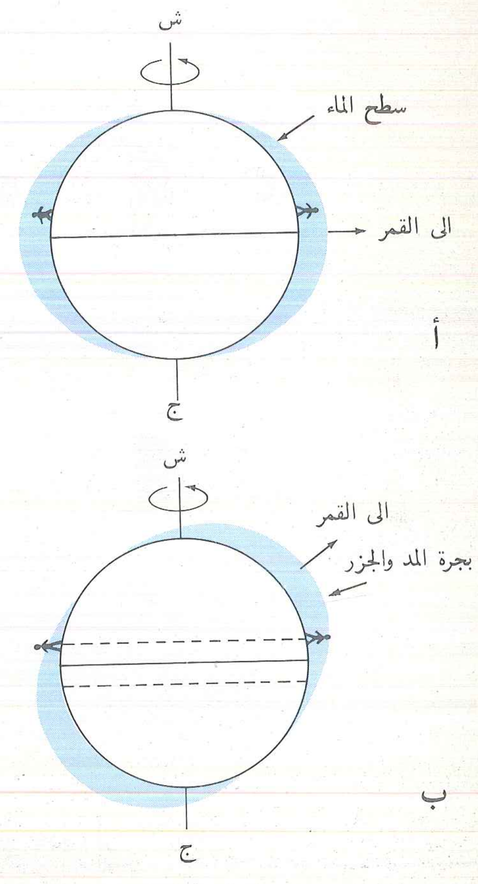


شكل 13 ـ 19
(أ) ـ المد. (ب) ـ الجزر بخليج فندى بنوفاسكوتيا كندا.

وعند ابتعاده عنها يتواجد فى منطقة جزر. وبالتالى فان المشاهد سيمر فى مدى يوم واحد بمدين وجزرين. وبالاضافة الى دوران الأرض فإن بروزى الماء يتحركان مع دوران القمر حول الأرض كل 28 يوما مما يسبب تأخر المد والجزر 50 دقيقة كل يوم. وبمرور يومٍ تكتمل الدورة لتبدأ دورة أخرى.

وقد لا يتساوى المد فى يوم معين. فبناء على موقع القمر قد يميل البروز المائى تجاه خط الاستواء كما هو موضح بالشكل (13 ـ 20 ب). ويبين هذا الشكل أن المشاهد فى نصف الكرة الشمالى يمر بمد على الجانب المقابل للقمر يكون أعلى من المد الذى يحدث بعد نصف يوم. أما على نصف الكرة الجنوبى فإن المشاهد يمر بعكس ذلك تماما.

وتؤثر الشمس كذلك على المد والجزر ولكن لكونها بعيدة فإن تأثيرها يكون أقل من القمر. فجاذبية الشمس يترتب عليها تغيرّ فى مستوى سطح البحر بأقل من نصف ما



شكل 13 ـ 20

بروزى الماء بمحيط ذو عمق مائى واحد. (أ) ـ عند خط الاستواء. (ب) ـ فوق مستوى خط الاستواء. عند الحالة الثانية يمر المشاهد بمدين وجزرين غير متساويين.

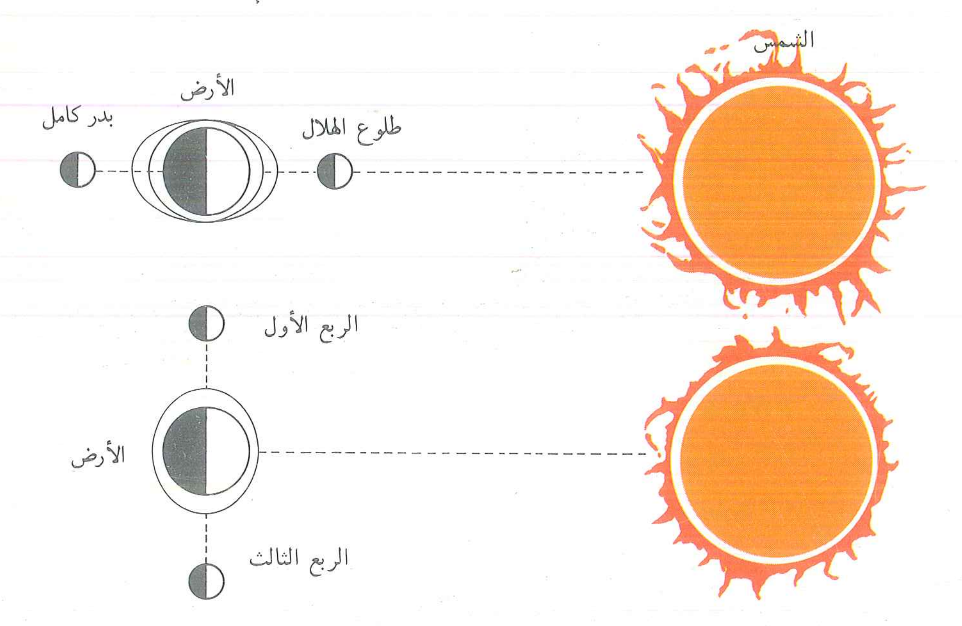
يترتب على جاذبية القمر. فقرب موعد بزوغ الهلال واستدارة البدر يكونان كلا من القمر والشمس على خط واحد مع الأرض مما يترتب عليه اجتماع قوة جذبهما (شكل 13 ـ 21 أ). وعليه فإن المد الناتج يكون أعلى ويكون الجزر اكبر تأثيرا. ويسميان **المد والجزر الربيعيين** واللذان ينتج عنهما أكبر مدى بين مد وجزر فى اليوم الواحد. وعلى عكس ذلك عند الربع الأول والثالث من الشهر القمرى، فإن قوة جاذبية القمر والشمس على الأرض تكون بزاوية قائمة وكل منهما يؤثر قليلا على قوة الآخر (شكل 13 ـ 21 ب). وعليه فإن مدى الفرق بين المد والجزر يكون عند حده الأدنى ويسميا عندها **بالمد أو الجزر المحاقيين.**

وبالرغم من أن الشرح الى هذا الحد قد تناول الأشكال والأسباب الرئيسية لارتفاع مستوى سطح البحر وانخفاضه فإن هذه الاعتبارات النظرية لا يمكن استعمالها للتنبؤ بمقدار المد والجزر فى مكان معين، حيث أن طبيعة شكل الشواطىء وأبعاد أحواض المحيطات تؤثر بدرجة كبيرة فى ذلك. وبالتالى فإن المد والجزر يسلكان سلوكا مختلفا تجاه القوة وراء تكونهما وذلك باختلاف المكان. وبناء على ذلك فإن المشاهدة هى أدق الطرق لتعيين طبيعة المد والجزر فى أى مكان. وجداول التنبؤ بالمد والجزر والمعلومات المتعلقة بها تعتمد على مثل هذه المشاهدات.

وتيارات المد والجزر مصطلح يستعمل للاشارة الى التدفق الأفقى للماء المتزامن مع ارتفاع وانخفاض مستوى سطح البحر. فعند المد يندفع الماء تجاه الشاطىء فى **فيض المد** غامرا النطاق المنخفض من الشاطىء. وعند الجزر يندفع الماء فى الاتجاه المعاكس فيما يعرف **بانحسار الجزر** كاشفا الجزء السفلى المغمور من الشاطىء.

وتعرف المساحة المتأثرة بتبادل هذين التيارين **بمسطح المد والجزر.** ويعتمد عرض سطح المد والجزر من مكان الى آخر حسب طبيعة الشاطىء. فقد تكون شريطا ضيقا وقد تكون مساحة كبيرة تغطى عدة كيلومترات مربعة.

وقد لا تكون تيارات المد والجزر مهمة فى البحر المفتوح ولكن حركتى المد والجزر قد ينتج عنها تيارات سريعة فى الخلجان والمضائق وغيرها من الأماكن غير المتسعة. فعند شواطىء برتانى الفرنسية تصل سرعة حركة الماء فى مد ذى ارتفاع حوالى 12 مترا. وتعتبر تيارات المد والجزر عامل تعرية ووسيلة نقل رسوبيات غير ذات أهمية كبيرة باستثناء مسلكها فى الأماكن الضيقة. وهى فى ذلك تقوم بتنظيف العديد من المداخل الضيقة لموانى جيدة قد تكون سدت فى حال غيابها.



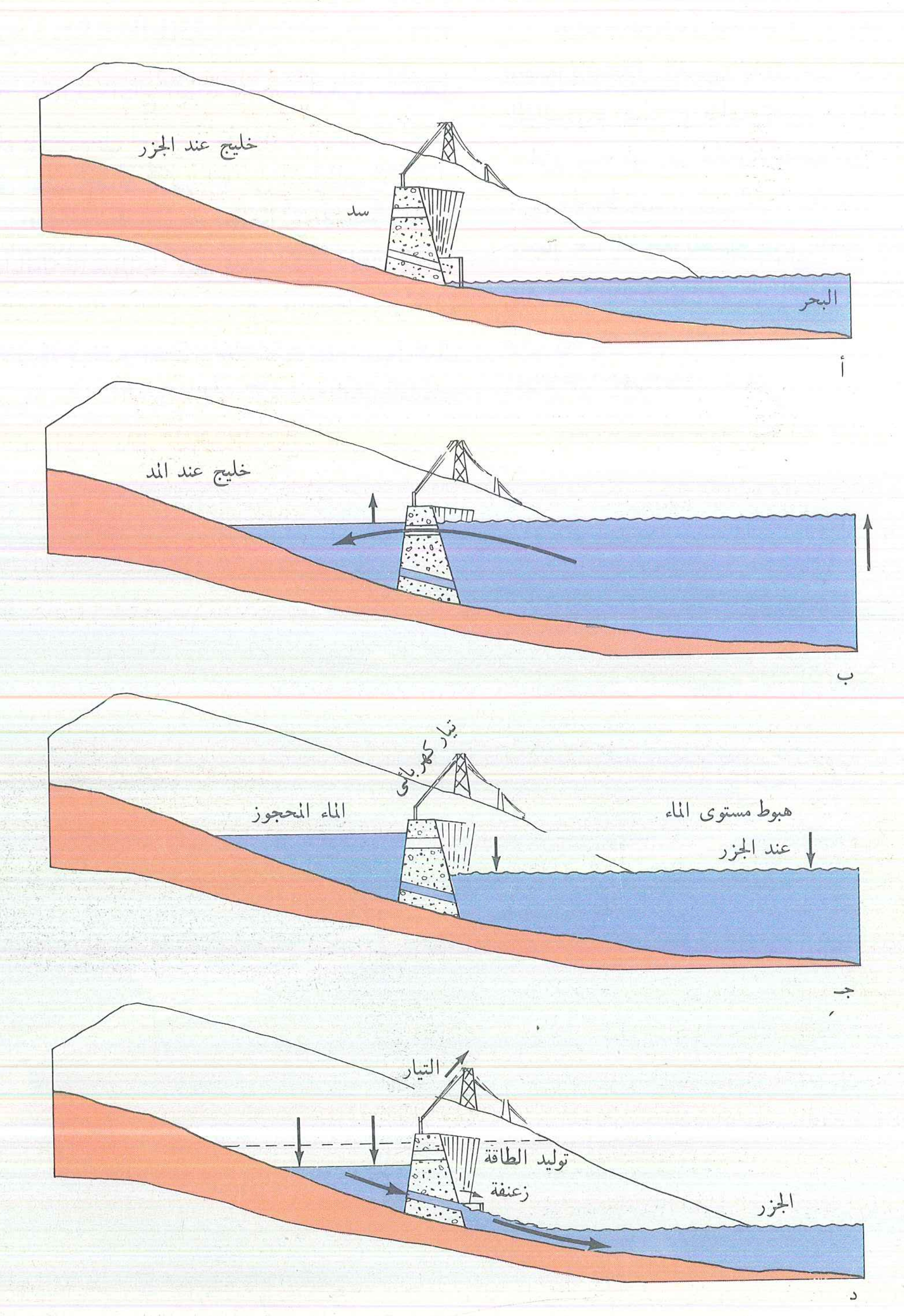
شكل 13 ـ 21
علاقة القمر والشمس بالأرض. (أ) ـ المد والجزر الاعلى. (ب) ـ المد والجزر المحاقى.



شكل 13 ـ 22
مستحاثة من المرجان عمرها 375 مليون سنة تمكن العلماء من معرفة عدد أيام السنة قديما بدراسة خطوط النمو على مثل هذه المستحاثة المرجانية.

المد والجزر ودوران الأرض:

يقوم المد والجزر بإبطاء حركة دوران الأرض. غير أن معدل الابطاء قليل جدا فقد تم تقدير هذه القيمة الضئيلة والثابتة بمدى يتراوح بين ثانية فى اليوم فى 120,000 سنة، وثانية فى اليوم فى 100،000 سنة. وبالرغم من ضآلة مقدارها غير أنها على مدى ملايين السنين من الآن قد تفقد الأرض تعاقب الليل والنهار. فإذا كانت الأرض تبطىء حركتها فإن الأيام كانت أقصر عبر الزمن الجيولوجى وعددها أكثر. وقد اتضح ذلك من دراسة الجيولوجيين للمستحاثات المرجانية والأصداف. فقد تم التعرف على عدد أيام السنة بعدد خطوط النمو اليومية فى العينات الجيدة الحفظ (شكل 13 ـ 22). وقد بينت مثل هذه الدراسات بأنه قبل 350 مليون سنة كانت السنة تعد من 400 الى 410 يوما، فيما كانت 390 يوما قبل 280 مليون سنة. وتتفق هذه الأرقام الى حد بعيد مع معدل الابطاء فى دوران الأرض.



شكل 13 ـ 23

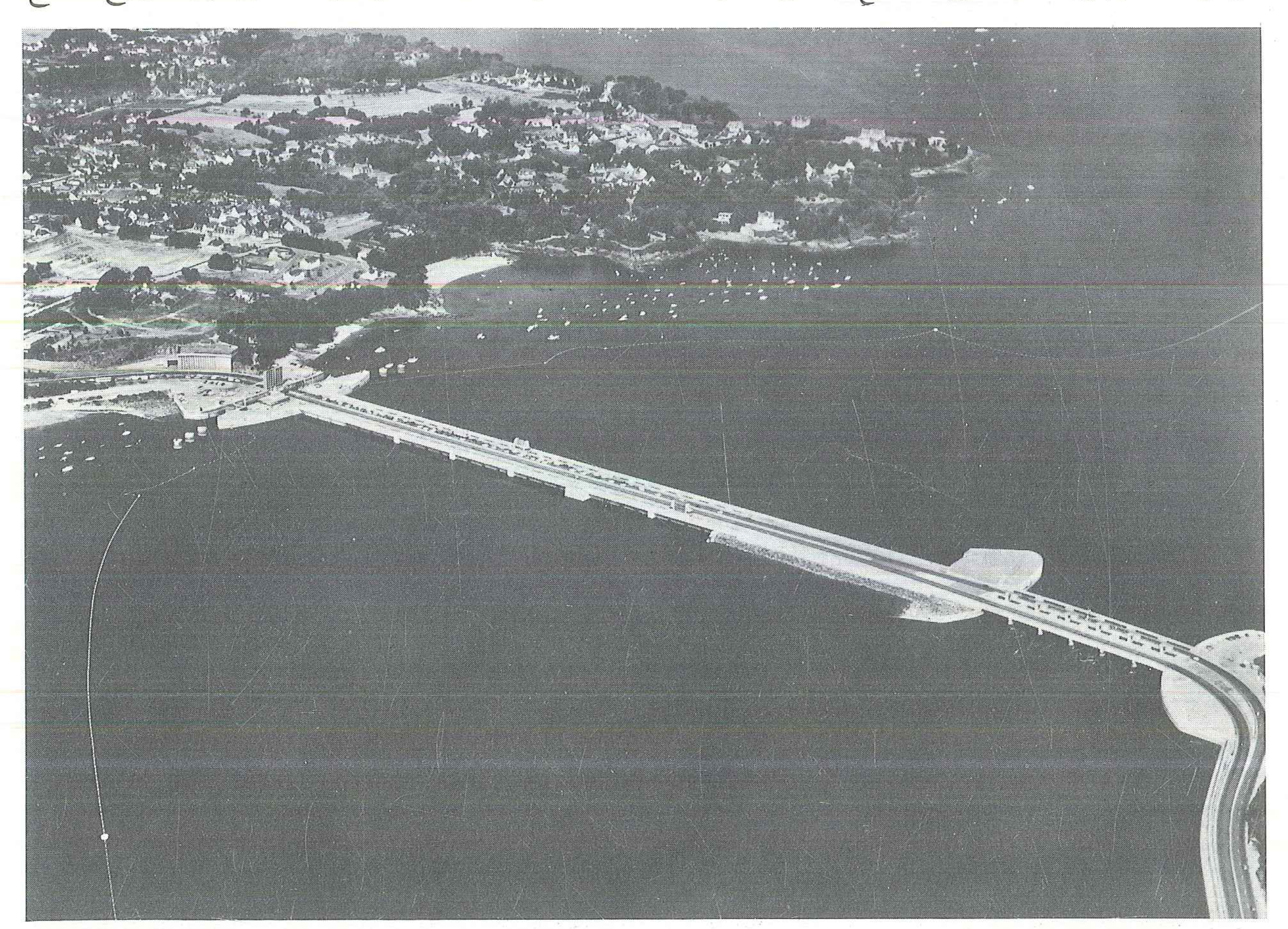
رسم مبسط يبين توليد الطاقة باستعمال ظاهرة المد والجزر بحجز الماء خلف سد.

المد والجزر وتوليد الطاقة

بزيادة تكاليف انتاج الطاقة ونضوب المخزون النفطى تم الاهتمام بإيجاد سبل أخرى لانتاجها. وبالرغم من إقتراح عدة طرق لتوليد الطاقة الكهربائية من المحيطات إلا أنه لم يحسن استغلالها الى الآن. ويعتبر المد والجزر لعدة قرون أهم مصادر الطاقة بالمحيطات. فمع بداية القرن الثانى عشر استغل الدولاب المائى الذى تحركه قوى المد والجزر فى ادارة طواحين الحنطة ومناشير الخشب. وقد كانت على سبيل المثال اكثر حاجيات مدينة بوسطن الأمريكية من الدقيق مصدره طواحين المد والجزر خلال القرنين السابع والثامن عشر.

ولزيادة الطلب فى يومنا هذا يلزم إيجاد سبل أكثر تقدما وتقنية لاستغلال القوى الناتجة عن الارتفاع والانخفاض الدائمين فى مستوى مياه المحيط. ويمكن تسخير قوة المد والجزر ببناء سد عبر خليج أو مصب نهر بمنطقة ساحلية ذات مدى ملحوظ بين منسوبى مدها وجزرها (شكل 13 ـ 23). وتعمل هنا الفتحة الضيقة بين الخليج والمحيط على ابراز الفرق بين مستوى الماء عند المد وعند الجزر. ويستفاد من اندفاع الماء عند دخوله الخليج وعند خروجه فى ادارة المولدات الكهربائية.

وخير مثال لتسخير قوة المد والجزر مشروع انتاج



شكل 13 ـ 24

أول محطة لانتاج الطاقة الكهربائية باستعمال ظاهرة المد والجزر على خليج مدخل نهر الرانس سنة 1966.

يصل المد هنا الى 13.5 مترا وهو من اعلى مستويات المد فى العالم.

الطاقة على نهر الرانس بفرنسا (شكل 13 ـ 24). وهو يعتبر أكبر المولدات المدارة بقوة المد والجزر. وقد بدأ العمل سنة 1966 م حيث ينتج ما يسد حاجة إقليم بريتانى من الطاقة الكهربائية الى جانب مساهمته فى سد البعض من إحتياجات عدة مناطق أخرى. ويوجد بالقرب من مرمانسك بالاتحاد السوفياتى وتاليانج بالصين محطات تجريبية أصغر حجما لانتاج الطاقة الكهربائية. هذا ولم يستفد بعد من طاقة المد والجزر فى كثير من بلدان العالم بالرغم من وجود مواقع مثالية لاستغلالها مثال خليج باساماكودى بولاية مين الأمريكية حيث يبلغ الفرق بين منسوب المد والجزر 15 مترا.

وفى معظم الشواطىء يصعب الاستفادة من هذا المصدر للطاقة حيث يكون مدى الفرق بين المد والجزر أقل من 8 أمتار أو لغياب الخلجان الضيقة مما يجعل مثل هذا المشروع غير اقتصادى التكاليف. ولهذا السبب سوف لن يساهم هذا المصدر من الطاقة الكهربائية بنسبة كبيرة من حاجيات العالم المتزايدة، غير أنه يجب أن لا يتوقف السعى الى استغلال المد والجزر كمصدر للطاقة، وذلك كما أشار بول ريون بقوله:

بالرغم من أن هذا المصدر للطاقة يمثل نسبة ضئيلة من احتياجات العالم، غير أن إستغلالها سيعمل على إنقاذ كمية هائلة من المخزون الكائن بباطن الأرض حيث أن قدرة مشاريع الطاقة المنتجة بقوتى المد والجزر بالعالم مجتمعة قد قدرت بحوالى 635,000 ميجاوات، أى ما يعادل اكثر من بليون برميل من النفط فى السنة.

وبالاضافة الى ذلك فإن الطاقة الكهربائية المنتجة من هذا المصدر لا تستهلك أى وقود وبالتالى لا ينتج عنها مخلفات ضارة بالصحة كما أنها تعمل على إتلاف أقل قدر ممكن من المساحة المجاورة اذا ما قورنت بالسدود المنشأة على مصاب الأنهار.

أسئلة للمراجعة:

1 ـ عدِّد ثلاثة معطيات تحدد ارتفاع وطول ودورة الموجه.

2 ـ صِفْ حركة جزيئات الماء عند مرور الموجه (شكل 13—2).

3 ـ اشرح ماذا يحدث عند انكسار الموجه.

4 ـ صِفْ طريقتين للتعرية بواسطة الأمواج.

5 ـ ما هو انحراف الأمواج؟ وما هو تأثير هذه العملية على الشواطىء المتعرجة (أنظر شكل 10—5).

6 ـ لماذا تسمى الشواطىء غالبا بأنهار الرمال؟

7 ـ لماذا تبنى الحنيّات؟ ولماذا يؤدى بناء حنيّة الى بناء أخريات؟

8 ـ صف تكوّن الأشكال التالية:

أجرف قطع الأمواج، أرصفة قطع الأمواج، الكومة البحرية، اللسان الرملى، عقبة مداخل الخلجان، التومبولو.

9 ـ اذكر ثلاثة إحتمالات لتكوّن جزر الحواجز.

10 ـ ما هى الأشياء التى يمكن أن تلاحظها حتى يمكنك وصف شاطىء بأنه منبثق؟

11 ـ هل توجد الأخوار مع الشواطىء المنبثقة أو المغمورة؟ لماذا؟

12 ـ اشرح حركة المد والجزر.

13 ـ علل لماذا يلاحظ المشاهد مدّين وجزرين غير متساويين فى اليوم الواحد (شكل 13—20).

14 ـ كيف تؤثر الشمس فى حركتى المد والجزر؟

15 ـ ما المقصود بفيض المد وانحسار الجزر؟

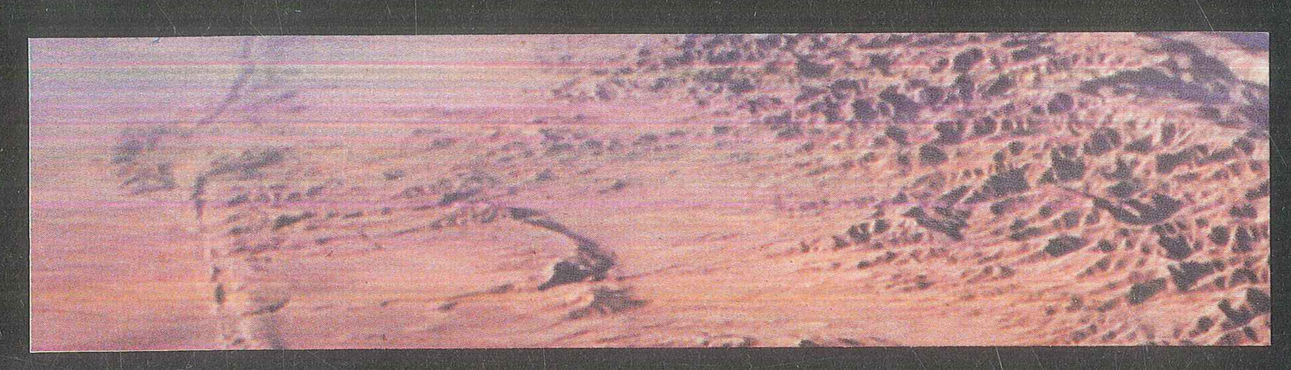
16 ـ كيف أثرت حركة المد والجزر فى دوران الأرض؟ وكيف جسّد الجيولوجيون هذه النظرية؟

17 ـ ما هى مميزات الطاقة المستمدة من المد والجزر؟ وهل من المحتمل أن تساهم الطاقة الكهربائية المنتجة هنا فى سد قدر كبير من حاجة العالم؟

الكلمات الدالة :

ارتفاع الموجة	wave height
أرضية قطع الأمواج	wave-cut platform
أمواج منكسرة	surf
انحسار الجزر	ebb tide
إنحراف الموجه	refraction
الجهد	fetch
تومبولو	tombolo
تيارات المد والجزر	tidal current
تيار شاطئى	longshore current
جرف شاطئى	beach drift
جرف قطع الأمواج	wave—cut cliff
جزر حواجز	barrier islands
حاجز مائى	jetty
حائل أمواج	breakwater
حنيّة	groin
دورة الموجة	wave period
ساحل مغمور	submerged coast
ساحل منبثقة	emerged coast
طول الموجة	wave length
عقبة مداخل الخلجان	baymouth bar
فيض المد	flood tide
قوس بحرى	sea arch
كشط	abrasion
كومة بحرية	sea stack
لسان رملى	spit
مد أو جزر	tide
مد أو جزر أعلى	spring tide
مسطح المد والجزر	tidal flats
موجة تذبذب	wave of oscilation
موجة انتقال	wave of translation

14



الزلازل


14

ما هو الزلزال؟

علم الزلازل (علم الاهتزاز)

تحديد مصدر الزلازل

الأحزمة الزلزالية

أعماق الزلازل

شدة الزلازل ومقدارها

دمـار الزلازل

- الدمار الذى تسببه الموجات الاهتزازية
- الموجات البحرية الاهتزازية (التسونامي)
- الحـرائـق
- الانهيارات الأرضية وهبوط سطح الأرض

التنبؤ بالزلازل وتجنب أخطارها

زلزال يقتل المئات

أوردت وكالات الأنباء الخبر التالى: اجتاح زلزال مدمر مدينة ماناجوا الواقعة بأمريكا الوسطى والتى يبلغ عدد سكانها 300,000 نسمة وذلك فى صباح يوم أمس، تاركا وراءه خسائر كبيرة فى الأرواح والممتلكات. وتشير التقديرات الرسمية بأن عدد القتلى قد وصل الى 18,000 نسمة، ولكن يبدو أن هذا الرقم مبالغ فيه.

(إن الحال هنا كمن يقف فوق الهلام) هذا ما نطق به فنى الاتصالات الفضائية راى هاشبرجر من محطة تبعد ميلين عن المدينة.

وتشير التقارير المؤكدة أن عدد القتلى قد بلغ مائتان على الأقل وآلاف من الجرحى منهم من بقى بدون مأوى. ولقد كانت الجثث وحطام المبانى متناثرة فى الشوارع، ونشبت الحرائق فى كثير من المبانى. ويعتقد بأن عدد الموتى سيصل الى 2000 .

وكثيرٌ ممن نجوا من الموت يجلسون فى مقاطع الطرقات مشدوهين، تحيط بهم الأشياء القليلة التى استطاعوا انقاذها من بين الأنقاض. وكثير آخرون قد فروا من المدينة.

لقد أصبح نصف القسم الواقع وسط المدينة آثارا بحلول الليل، اذ قضى الزلزال على 36 تجمعا سكنيا فى وسط المنطقة.

واشتعلت النيران دون توقف حتى المساء. فقد وقع الزلزال الذى يتراوح بين 6 و 7 على مقياس ريختر فى الساعة 12:40 من صباح يوم أمس بعد عدة رجّات خفيفة.

وانقطعت كل الاتصالات العادية والمياه والكهرباء. وكانت بعض السفارات ضمن المبانى المهدمة.

جاك برتون الذى كان فى مدينة ليما - بيرو عندما هزها زلزال 31 مايو 1970 وصف زلزال ليما بأنه كان اكثر تدرُّجا رغم بلوغه نفس الشدة على مقياس ريختر. وأضاف معلقا أن هذا الزلزال جاء فجأة مثل قاطع الطريق. لقد أوقعنا على ركبنا ولم يكن لدينا أى تحذير على الاطلاق. وقد قال أحد الناجين «لقد انتابنا شعور بنهاية العالم».

الآلاف يملؤن الشوارع مشدوهين وآلاف آخرون هربوا الى الريف بينما ارتفعت أعمدة الدخان من الانقاض.

وحتى ليلة البارحة قيل إن النيران قد تم إخمادها مع استمرار الهزات الخفيفة خلال النهار حتى المساء متسببة فى انفصال الحطام من المبانى التى تهدمت.

أثر فالق سان اندرياس فى منطقة سهل كاريزو بجنوب كاليفورنيا.



شكل 14 ـ 1

تقع هذه المبانى المتكئة فوق تربة غير متماسكة كانت تشبه الرمال المتحركة خلال زلزال 1964 فى نيجاتا اليابانية وبالرغم من أن معظم المبانى لم تتصدع الا أن وضعها الجديد غير مرغوب فيه.

شكل 14 ـ 2

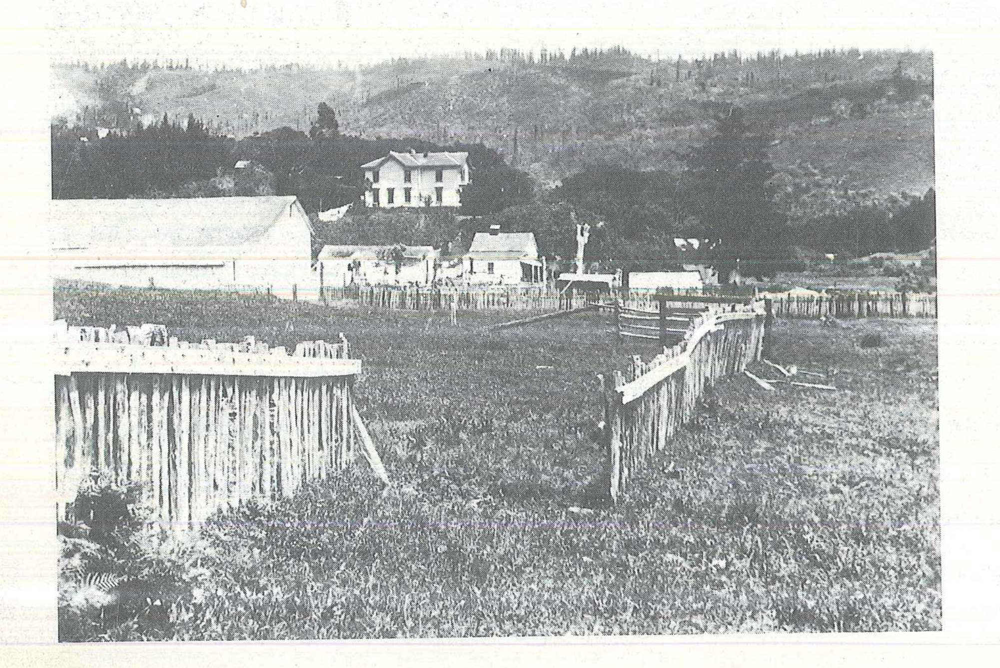
مدينة سان فرانسيسكو وهى تشتعل بعد زلزال 1906 .

هذا ليس هو الزلزال الأول من نوعه الذى يهز مدينة ماناجوا وقد لا يكون الأخير. ويحدث حول العالم ما يقارب مليون زلزال كل سنة. ولحسن الحظ فان قليلا منها له تأثير مدمر كالذى حدث فى مدينة ماناجوا سنة 1972، والذى قد تم وصفه آنفا. وفى الغالب لا يحدث إلا عدد قليل جدا من الزلازل المدمرة كل سنة. وعند حدوثها فانه يحق وصفها بأعتى القوى الطبيعية المدمرة على وجه الأرض. إن اهتزاز الأرض المصحوب بارتجاج التربة يسبب الخراب والدمار للمبانى (شكل 14 ـ 1). هذا بالاضافة الى أن خطوط التيار الكهربائى والغاز غالبا ما تتحطم فى المناطق الآهلة بالسكان مسببة عدداً من الحرائق. ففى زلزال مدينة سان فرانسيسكو عام 1906، كان سبب معظم الدمار هو الحرائق التى لم يكن من الممكن التحكم فيها. فقد تركت خطوط المياه المحطمة رجال المطافىء دون ماء كاف للاطفاء (شكل 14 ـ 2).

ما هو الزلزال؟

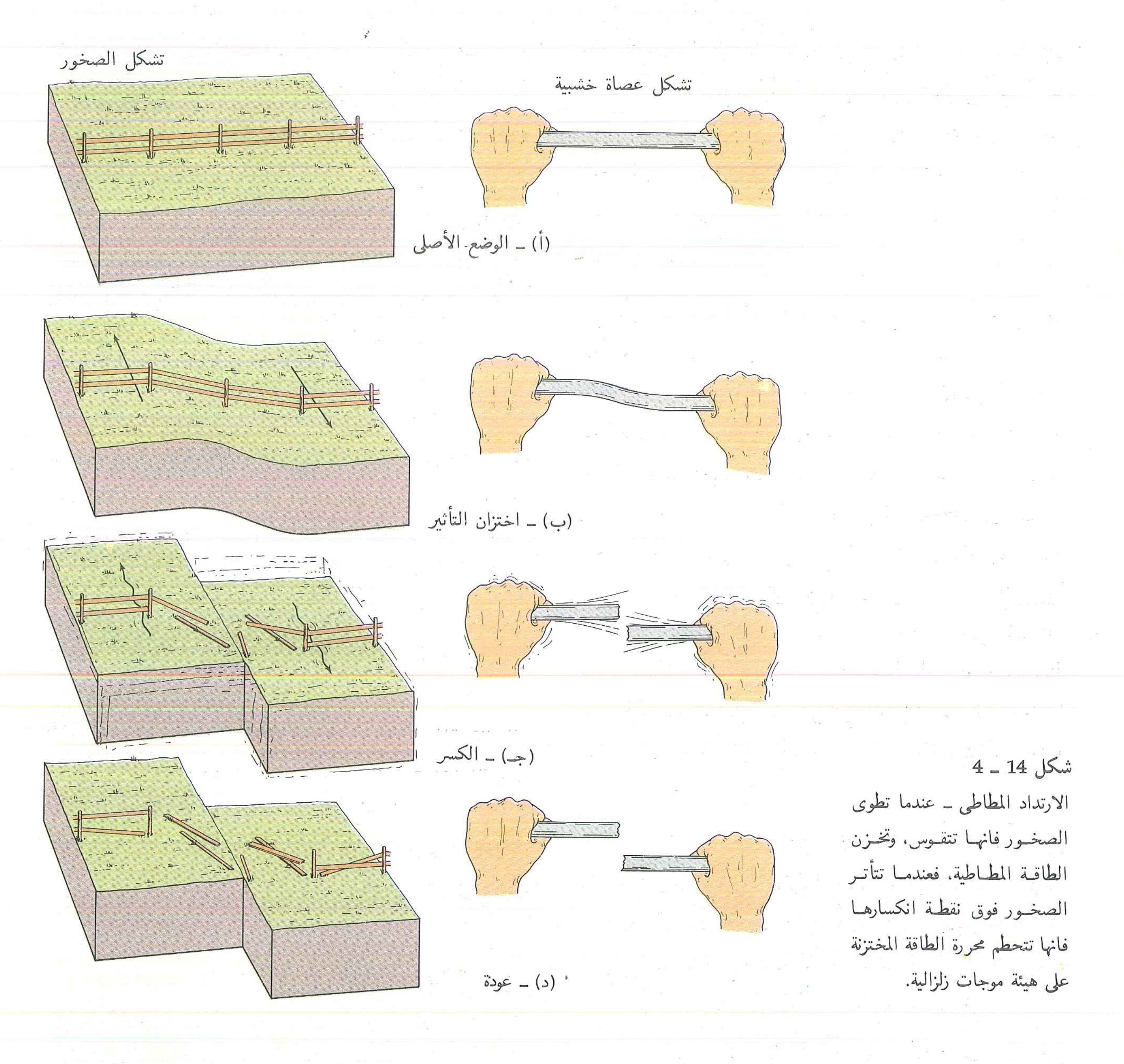
الزلزال هو اهتزاز الأرض الناشىء عن التحرر السريع للطاقة. وتنطلق هذه الطاقة فى جميع الاتجاهات من مصدرها الأصلى أو **البؤرة** فى شكل موجات مشابهة تماما لتلك التى يحدثها جرس عند دقه مسببا اهتزاز الهواء المحيط به. وأثناء حدوث زلزال، ولعدة ساعات بعد حدوثه، يمكن تشبيه الأرض بالجرس أثناء رنينه رغم أن الطاقة تتشتت بسرعة كلما بعدت المسافة من البؤرة. كما أن جميع أجهزة رصد الزلازل فى العالم تسجل هذه الواقعة.

فالطاقة الهائلة التى يطلقها الانفجار الذرى أو الفوران البركانى قد تنتج زلزالا ولكن هذه الكوارث تعتبر ضعيفة وغير دائمة. ولكن ما هى القوة المسببة للزلازل المدمرة؟ توجد أدلة كثيرة توضح أن الأرض ليست كوكبا ساكنا. إذ يمكن مشاهدة عدة مصاطب قديمة خلفتها الأمواج تعلو أقصى ارتفاع للمد بعدة أمتار. وتشير الى رفع القشرة الأرضية بمقدار مساوٍ، بينما توجد مناطق أخرى بها أدلة على إنخفاض ملحوظ فى سطح الأرض. وبالاضافة الى هذا الانزلاق الرأسى، يشير التفاوت فى خطوط الأسوار والطرق والهياكل الاصطناعية، الى شيوع الحركات الأفقية (شكل 14 ـ 3). وهذه الحركات غالبا ما تصاحبها شقوق كبيرة فى سطح الأرض والتى تعرف **بالفوالق** أو الصدوع. ويمكن تفسير



شكل 14 ـ 3

لقد ازيح هذا السياج متران ونصف المتر خلال زلزال 1906 بسان فرانسيسكو.



شكل 14 ـ 4
الارتداد المطاطى ـ عندما تطوى الصخور فانها تتقوس، وتخزن الطاقة المطاطية، فعندما تتأثر الصخور فوق نقطة انكسارها فانها تتحطم محررة الطاقة المختزنة على هيئة موجات زلزالية.

معظم الحركات على امتداد الصدوع تفسيرا مرضيا باستعمال نظرية حركية الألواح.

ويفترض نموذج حركية الألواح أن كتلا كبيرة من الأرض هى فى حركة دائبة. وتتأثر الألواح المتحركة بالألواح المجاورة لها متسببة فى تأثرها واعادة تشكيلها عند الحواف. وتحدث معظم الزلازل على امتداد أطراف الألواح.

وقد حيرّت الميكانيكية الحقيقية لحدوث الزلازل جميع الجيولوجيين إلى أن قام هـ. ف. رِيدْ بدراسة لاحقة لزلزال 1906 بسان فرانسيسكو. وقد صاحب الزلزال ظهور ازاحات أفقية لعدة أمتار على امتداد الجزء الشمالى لفالق سان أندرياس. وهو شق فى الأرض طوله 950 كيلومترا ويتخذ اتجاه الشمال فى جنوب ولاية كاليفورنيا. ويفصل هذا

الصدع الكبير بين مناطق من سطح الأرض تعرف بلوح الشمال الأمريكي ولوح المحيط الهادى. وتشير الأدلة الحقلية الى انزلاق لوح المحيط الهادى أثناء هذا الزلزال مسافة 6 أمتار فى اتجاه الشمال بمحاذاة لوح الشمال الأمريكي.

وباستعمال قياسات مساحية عديدة تفصل بينها عدة سنوات اكتشف رِيدْ أنه خلال الخمسين سنة التى سبقت زلزال سنة 1906، فقد أظهر سطح الأرض عند النقاط البعيدة على جانبى الفالق ازاحة نسبية تزيد قليلا عن ثلاثة أمتار. ويوضح الشكل 14 ـ 4 الميكانيكية التى استنبطها رِيدْ لحدوث الزلازل. وتعمل القوى الحركية على تَشَكُّل صخور القشرة الأرضية ببطء شديد على جانبى الفالق كما يتضح من انحناء الانشاءات. وتنحنى الصخور تحت هذه الظروف، وتخزن طاقة مرنة مثل ما يحدث لعمود من الخشب عند ثنيه. وفى النهاية يتم التغلب على القوى التى تشد الصخور مع بعضها. وعندما يحدث الانزلاق فى أضعف المناطق وهى البؤرة، تحدث الازاحة الناشئة تأثيرا على امتداد الصدع حيث يقع انزلاق إضافى حتى يتم تحرر كل الأثر المخزن فيسمح الانزلاق بعودة الصخور المشكلة الى وضعها الأصلى. وعندما تعود الصخور الى وضعها الأصلى لكونها مرنة فانها تسبب فى حدوث الزلزال. وقد أطلق رِيدْ على ظاهرة ارتداد الصخور الى موضعها الأصلى عبارة **الارتداد المرن** حيث أن الصخور تتصرف بمرونة مثلما يحدث عند ارتخاء (حلقة من المطاط) بعد شدها.

لقد استمرت الهزات الشديدة لزلزال 1906 بسان فرانسيسكو حوالى 40 ثانية. ورغم أن معظم الازاحات على امتداد الفالق قد حدثت خلال هذه البرهة القصيرة إلاّ أن حركات اضافية وتعديلات فى الصخور قد استمرت لعدة أيام بعد وقوع الزلزال الرئيسى. وتسبب التعديلات التى تحدث عقب وقوع زلزال كبير عادة، فى عدة زلازل خفيفة تسمى **بالرجات التلوية**. ورغم أن هذه الرجات التلوية هى أضعف بكثير من الزلزال الرئيسى، إلاّ أنها تسبب دمارا كبيرا فى بعض الأحيان للمنشآت التى تأثرت بالاهتزاز من قبل.

هذا بالاضافة الى أن عددا من الهزات الخفيفة المسماة **بالرجات الأمامية** غالبا ما تسبق الزلزال الرئيسى بعدة أيام أو بعدة سنوات فى بعض الأحيان. وقد استفيد من رصد هذه الرجات الأمامية فى التنبؤ بالزلازل القوية القادمة. وسوف نستعرض موضوع التنبؤ بالزلازل فى جزء آخر من هذا الفصل.

أن القوى الحركية التى أدت الى التوتر والذى تم انطلاقه خلال زلزال 1906 بسان فرانسيسكو، لا تزال نشطة. وتستعمل أشعة اللايزر فى الوقت الحاضر لتحديد الحركة النسبية بين الجانبين المتقابلين على هذا الفالق. وقد أظهرت هذه القياسات ازاحة مقدارها سنتيمترين فى السنة. ورغم أن معدل هذه الحركة يبدو بطيئا فهو يعتبر فى الحقيقة كبيرا بقياس الزمن الجيولوجى. اذ خلال 30 مليون سنة يكفى هذا المعدل لانزلاق الجزء الغربى من ولاية كاليفورنيا الى الشمال بحيث تصبح مدينة لوس أنجلوس التى تقع على لوح المحيط الهادى المتحرك فى اتجاه الشمال، بمحاذاة مدينة سان فرانسيسكو التى تقع على لوح أمريكا الشمالية. وعندما يصل التوتر مرة أخرى المستوى اللازم فإنه يمكن توقع انزلاق مصحوب بزلزال.

ومن المقدر أن تقع زلازل كل 50 الى 200 سنة على امتداد أطراف الألواح المماثلة لفالق سان أندرياس. وقد وصفت هذه الحركة المتكررة بأنها تمثل حركة الانزلاق الرجفى حيث أن الطاقة المرنة قد تم اختزانها لفترة من الزمن تم انطلاقها بعد ذلك عن طريق الانزلاق.

ليس كل حركة على امتداد فالق سان اندرياس هى من هذا النوع الرجفى. إذ تمثل هذه الحركة زحفا بطيئا على امتداد أجزاء معينة من هذا الفالق. ولهذا، فبينما تزحف بعض أجزاء الفالق باستمرار، يتجمع التوتر ببعض الأجزاء الأخرى المقفلة مما يؤدى الى وقوع زلزال قوى. وإضافة الى ذلك، فليس كل الحركات على امتداد الصدوع هى حركات أفقية كما يحدث على امتداد فالق سان أندرياس. إذاً تعتبر

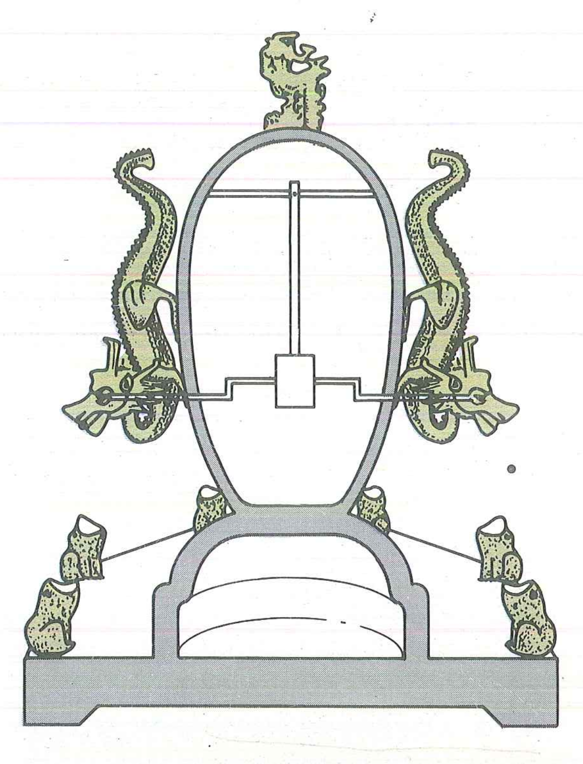


شكل 14 ـ 5
واجهة صخرية ناتجة عن الازاحة الرأسية على امتداد صدع خلال زلزال 1964 بألاسكا.

الازاحة الرأسية على امتداد الصدوع شائعةً جداً، حيث يرتفع أحد الجوانب الى أعلى بالنسبة للجانب الآخر. ويوضح شكل (14 ـ 5) واجهة احدثتها مثل هذه الازاحة الرأسية. وبنفس الطريقة فان زلزال قودفرايداى (الجمعة المباركة) بألاسكا سنة 1964، قد أحدث إزاحة رأسية مقدارها 15 مترا فى أحد المواقع. كما تحدث عدة زلازل على أعماق كبيرة بحيث لا تظهر ازاحاتها على سطح الأرض.

علم الزلازل (علم الاهتزاز)

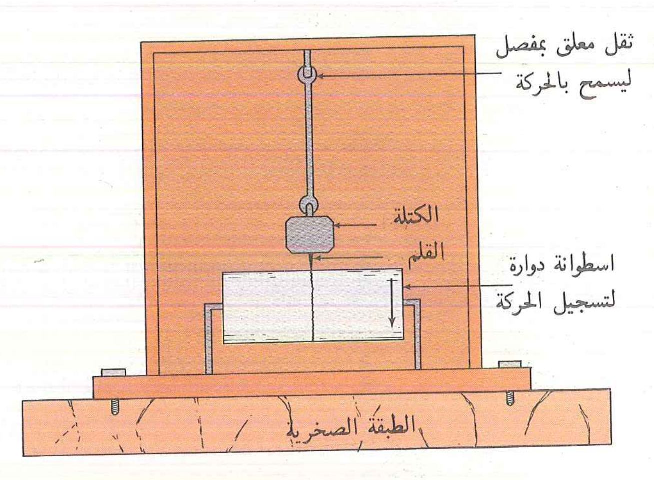
ترجع دراسة علم الزلازل (الموجات الاهتزازية) الى محاولات قام بها الصينيون منذ حوالى 2000 سنة لتحديد المصدر الذى تنشأ عنه موجات الزلازل. وجهاز قياس الاهتزاز الذى استعمله الصينيون هو عبارة عن جرّة كبيرة مجوفة تحتوى على كتلة معلقة من أعلى (شكل 14 ـ 6). وهذه الكتلة المعلقة، التى تشبه ساعة البندول، متصلة بطريقة ما بفكوك عدد من التماثيل التى على هيئة تنِّينات تحيط بالجرّة ويوجد بين فكّى كل تنين كرة معينة. وعندما تصل الموجات الزلزالية الى الجهاز فان الحركة النسبية بين الكتلة المعلقة والجرة قد تسمح بسقوط بعض الكرات المعدنية

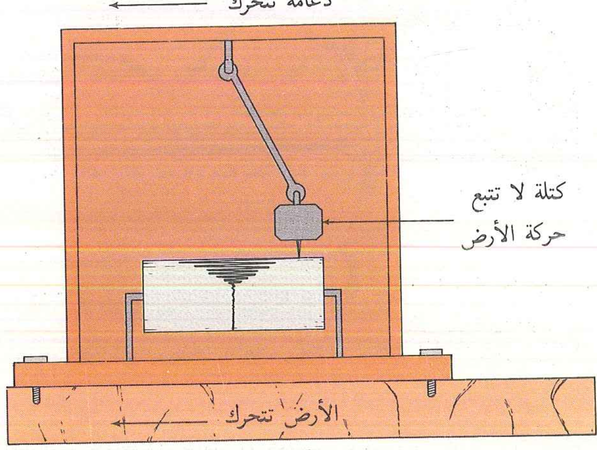


شكل 14 ـ 6
مرجفة صينية عتيقة. خلال الهزات الأرضية تسقط الكرات المعدنية من افواه التنينات الواقعة فى الاتجاه الرأسى للحركة، فتتلقفها افواه الضفادع التى تحتها.

من أفواه التنينات الى أفواه تماثيل الضفادع المنتظرة تحتها. وقد يكون الصينيون على علم بأن الحركة القوية الأولى للزلزال لها اتجاه. وعندما تكون الحركة بدرجة قوية فان كل الأشياء غير المثبتة سوف تتهاوى فى نفس الاتجاه. ويبدو أن الصينيين استعملوا هذه الحقيقة للكشف على اتجاه مصدر الزلزال. ولكن الحركة المعقدة للموجات الزلزالية تجعل من المستبعد فى أغلب الأحيان أن يتم تحديد الاتجاه الحقيقى للزلزال.

ومن حيث المبدأ على الأقل فان المرجفة الحديثة (مرسمة الزلازل)، وهى جهاز تسجيل الموجات الزلزالية، تشبه الجهاز الذى استعمله الصينيون القدماء. فالمرجفة كتلة معلقة من

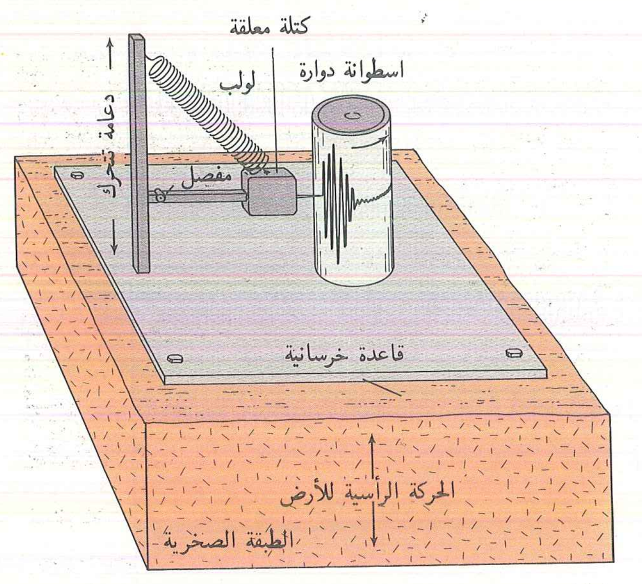




شكل 14 ـ 7

مبدأ عمل المرجفة ـ تعمل قوة القصور الذاتى للكتلة المعلقة على بقائها ساكنة بينما تهتز اسطوانة التسجيل المثبتة الى الصخور تحتها استجابة للموجات الاهتزازية. وبذلك تعمل الكتلة الثابتة عمل المرجع الذى يمكن بواسطته قياس مقدار الازاحة الناتجة عندما تمر الموجات الزلزالية بالصخور تحتها.

وتد مثبت فى الأرض (شكل 14 ـ 7). وعندما تصل الاهتزازات الناتجة عن زلزال بعيد عن جهاز التسجيل فان **القصور الذاتى** للكتلة تبقيها ساكنة نسبيا بينما تتحرك الأرض مع الوتد. ويتم تسجيل حركة الأرض بالنسبة للكتلة الساكنة على قرص دوار أو على شريط ممغنط.

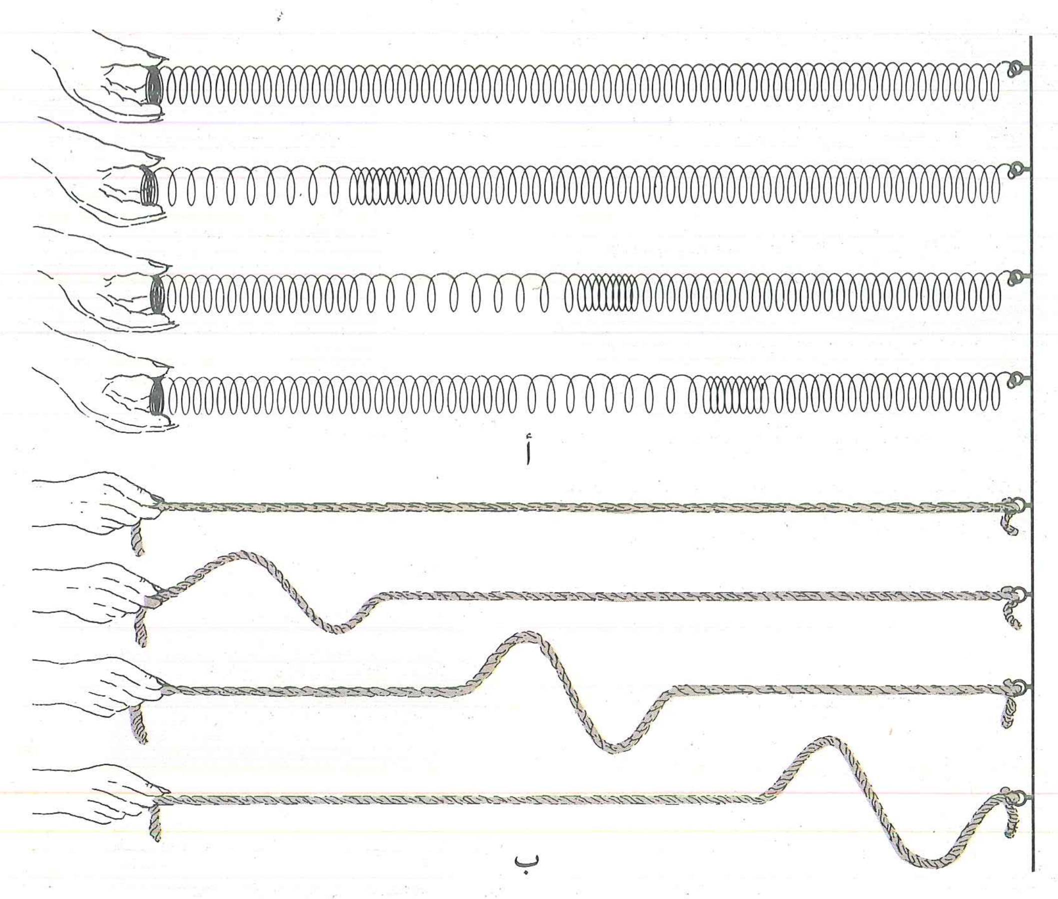


شكل 14 ـ 8

مرجفة مصممة لتسجيل الحركة الرأسية للأرض.

ونظرا لأن الزلزال يُحدِثُ حركة رأسية وأخرى أفقية، فانه توجد حاجة الى أكثر من نوع من المراجف. وقد صمم الجهاز الموضح فى الشكل 14 ـ 7 بحيث تتأرجح الكتلة من جانب الى جانب كاشفة بذلك الحركة الأفقية لسطح الأرض. وعادة ما يتم استعمال جهازين لقياس الحركات الأفقية؛ أحدهما فى اتجاه شمال ـ جنوب والآخر فى اتجاه شرق ـ غرب. ويمكن الكشف عن حركة الأرض الرأسية إذا ما علقت الكتلة من لولب كالمبين فى الشكل 14 ـ 8.

ويمكن توضيح المبدأ الذى تقوم عليه المرجفة بربط كتلة ثقيلة فى خيط والامساك بالنهاية الأخرى للخيط بحيث يكون الثقل معلقا قريبا من الأرض. وتمثل الحركة السريعة للخيط من جانب الى جانب، الاهتزازات التى يحدثها الزلزال. لاحظ أن الكتلة تبقى ساكنة. وأى حركة تلاحظها سوف تكون بسيطة، وهى تمثل التأرجح الطبيعى للبندول (ذلك يشبه تأرجح بندول الساعة). هذا كما تزود المرجفات الحديثة لقياس الزلازل بوسيلة خاصة لتضاؤل الموجات وذلك لازالة أثر التأرجح للكتلة المعلقة.



شكل 14 ـ 9

أنواع الموجات العميقة وحركاتها المميزة. (أ) ـ الموجات الأولية (و) تعمل على اهتزاز جزيئات المادة الى الأمام والى الخلف فى نفس الاتجاه الذى تتحرك فيه الموجات. (ب) ـ الموجات الثانوية (ث) تعمل على تأرجح الجزيئات فى اتجاه عمودى على اتجاه حركة الموجات.

ولكى يتم الكشف على الزلازل الضعيفة جدا أو الزلازل القوية التى تحدث فى أجزاء أخرى من العالم، فان أجهزة رصد الزلازل تصمم بحيث تعمل على تضخيم الحركة الحقيقية لسطح الأرض. ولكن هناك حدود عملية لكمية التضخم الممكنة. كما تسجل المراجف كمية لا بأس بها مما نسميه بالتشويش الذى تسببه الرياح أو ارتطام الأمواج بشاطىء بعيد، أو حركة مرور المركبات الآلية القريبة. إن زيادة حساسية المراجف تعمل فقط على زيادة التشويش الذى يعتم بدوره على اهتزازات الزلازل الضعيفة. وعلى العكس من ذلك، فان أجهزة أخرى تصمم بحيث لا تتأثر بالحركة العنيفة لسطح الأرض التى تحدث قرب مصدر الزلزال.

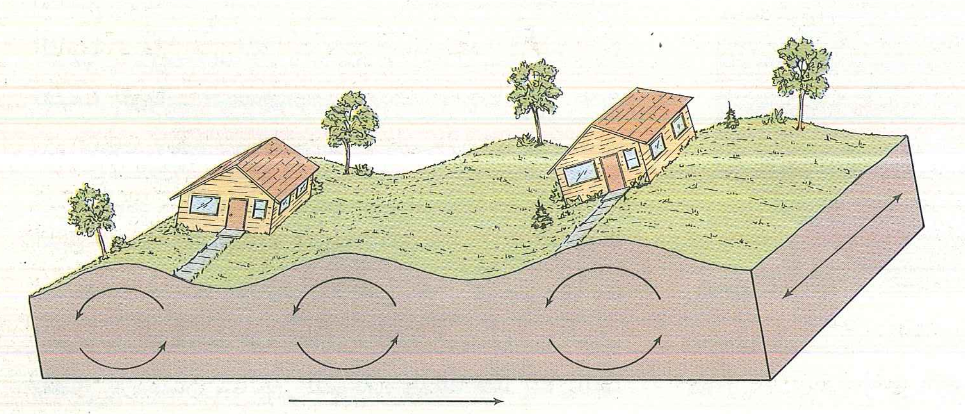
وتزودنا التسجيلات التى نحصل عليها من المرجفة والمسماة **بسجل المرجفة**، بمعلومات كثيرة تتعلق بشكل الموجات الزلزالية. وهى شكل من أشكال الطاقة المرنة التى تنتشر فى جميع الاتجاهات من البؤرة. ويمكن مقارنة تولد الطاقة بالاهتزاز الناشىء عن قطعة من الهلام فى صحن عندما يغرف جزء منها بالملعقة. وبينما يتصف الهلام بنوع

واحد من أنواع الاهتزاز فان سجل المراجف يظهر أن هناك مجموعتين رئيسيتين من الموجات الزلزالية تنشأ من انزلاق الكتل الصخرية. أحدهما ينتقل عبر الطبقات الخارجية للأرض يسمى **بالموجات السطحية**. أما المجموعة الأخرى من الموجات والمسماة **بالموجات العميقة**، فتنتقل خلال الأجزاء الداخلية للأرض. وتنقسم الموجات العميقة الى نوعين: **موجات أولية** (و) **وموجات ثانوية** (ث). وأساس هذا التقسيم هو الطريقة التى تنتشر بها هذه الموجات فى المواد التى تنتقل عبرها. فالموجات الأولية (و) تدفع (تضغط على) الصخور وتجذبها (تمدها) فى اتجاه انتقال الموجات. وحركة هذه الموجات هى مشابهة تماما لحركة الحبال الصوتية عندما تحرك الهواء من جهة الى أخرى لاحداث الصوت. أما الموجات الثانوية (ث) فهى تهز الجزيئات فى اتجاه عمودى على اتجاه انتقال الموجات. ويمكن توضيح ذلك بربط أحد طرفى حبل إلى ركيزة سور ثم هز الطرف الآخر مع بقاء الحبل مشدودا.

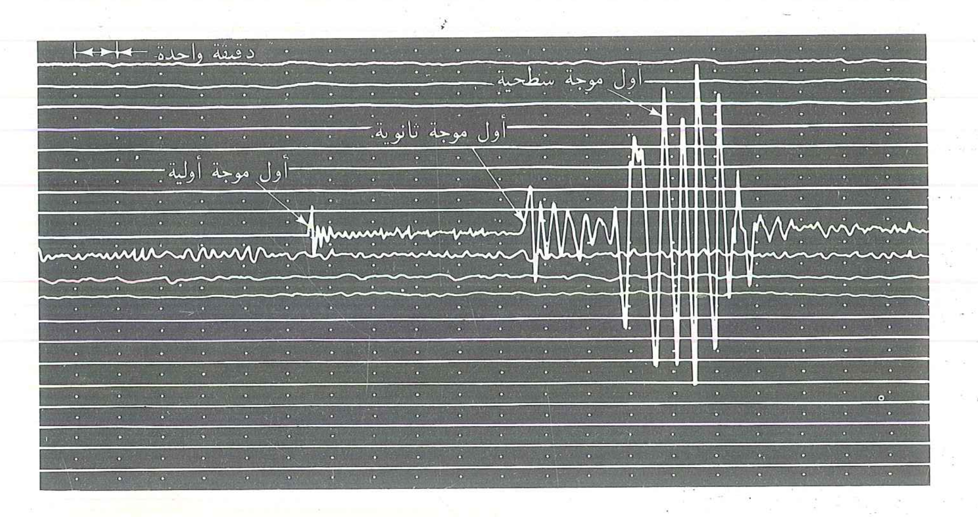
لاحظ كما فى شكل 14 ـ 9 أن انتشار الموجات الأولية يتضمن تغيُرا فى حجم وشكل المواد التى تتخللها، بينما يتضمن انتشار الموجات الثانوية تغيّرا فى الشكل فقط. وحيث أن جميع الأجسام الصلبة والسوائل والغازات تقاوم القوى الضاغطة وترتد الى موقعها بالمرونة بعد ازالة القوة المؤثرة، فانه يمكن انتقال الموجات الأولية فى كافة المواد. ومن ناحية أخرى، فان الموجات الثانوية تغيّر فقط من شكل المادة المنتقلة خلالها. وبما أن السوائل لا تقاوم التغيّر فى الشكل فان الموجات الثانوية لا تنتقل خلالها.

وتعتبر الموجات السطحية اكثر تعقيدا نوعا ما (شكل 14 ـ 10). وأثناء انتقال الموجات السطحية عبر سطح الأرض فانها تسبب فى حركته وحركة كافة الأشياء القائمة فوقه بنفس الطريقة التى تقذف بها أمواج المحيط العاتية سفينة فوق سطح الماء. فبالاضافة الى حركة الموجات السطحية الى أعلى والى أسفل فهى تتحرك أيضا من جانب الى جانب آخر مشابه لحركة الموجات الثانوية المتجهة افقيا. وهذه الحركة الأخيرة هى سبب الدمار الذى يلحق بالمبانى والأساسات.

وبملاحظة سجل نموذجى لمرجفة كما فى شكل (14 ـ 11) فان أحد الفروق بين هذه الموجات الزلزالية يبدو واضحا. إذ تصل الموجات الأولية الى محطات التسجيل قبل الموجات الثانوية. وهذه بدورها تصل قبل الموجات السطحية. ويرجع ذلك الى السرعة النسبية لكل منها. ولغرض التوضيح فان سرعة الموجات الأولية عبر حجر الجرانيت فى القشرة الأرضية تقدر بحوالى 6 كيلومترات، بينما تنتقل الموجات الثانوية تحت نفس الظروف بسرعة 3.5



شكل 14 ـ 10
تتألف الموجات السطحية من نوعين من الحركات أحدها ينتج حركة معقدة الى فوق والى تحت شبيه بتموجات مياه المحيطات والأخرى تضرب فى الأرض من جانب الى جانب أو ان يكون لها حركة رأسية.



شكل 14 ـ 11

سجل اهتزازى نموذجى. لاحظ الفترة الزمنية بين وصول كل نوع من الموجات.

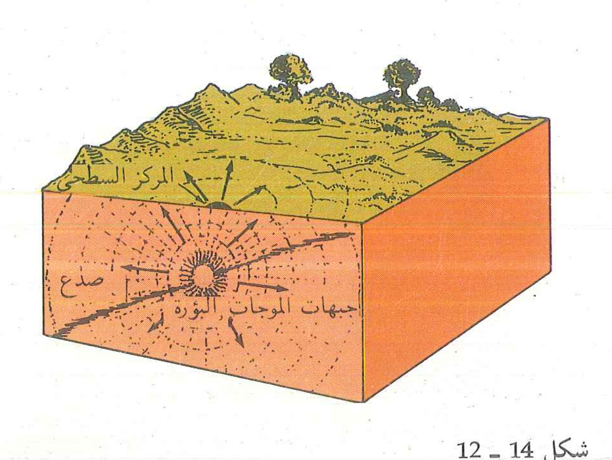
كيلومترا فى الثانية. وتتوقف سرعة هذه الموجات فى المواد المنتقلة خلالها على الفروق فى الكثافة وخواص مرونة تلك المواد. ففى الماء مثلا تبلغ سرعة الموجات الأولية 1.5 كيلومترا فى الثانية بينما تبلغ سرعة الموجات الثانوية صفر كيلومترا فى الثانية. وتنتقل عموما الموجات الأولية فى المواد الصلبة بسرعة تعادل 1.7 ضعفا من سرعة الموجات الثانوية. كما يتوقع أن تنتقل الموجات السطحية بسرعة تعادل 0.9 مرّة من سرعة الموجات الثانوية المنتقلة فى الطبقات التى تحتها.

وبالاضافة الى فروق السرعة، لاحظ أيضا كما فى شكل (14 ـ 11) بأنه توجد فروق فى الارتفاع أو على الأصح فى المقدار لهذه الأنواع من الموجات. فللموجات الثانوية مقدار أكبر قليلا من مقدار الموجات الأولية. بينما تتصف الموجات السطحية التى تسبب أغلب الدمار بمقدار أكبر كذلك. ونظرا لأن الموجات السطحية محدودة فى مساحة ضيقة قرب السطح ولا تنتشر عبر الكرة الأرضية كما هو الحال بالنسبة للموجات الأولية والثانوية، فان الموجات السطحية تحتفظ بمقدارها الأقصى لمدة أطول. كما أن للموجات السطحية فترة أطول (الفترة هى الزمن الذى يفصل بين قمتين متتاليتين للموجة). ولذلك فقد يشار اليها بالموجات الطويلة أو موجات سطحية (ط).

وكما سنرى فيما بعد فان الموجات الزلزالية تستعمل فى تحديد موقع وشدة الزلزال. وبالاضافة الى ذلك فان الموجات الزلزالية تزودنا بوسيلة لسبر أعماق الأرض.

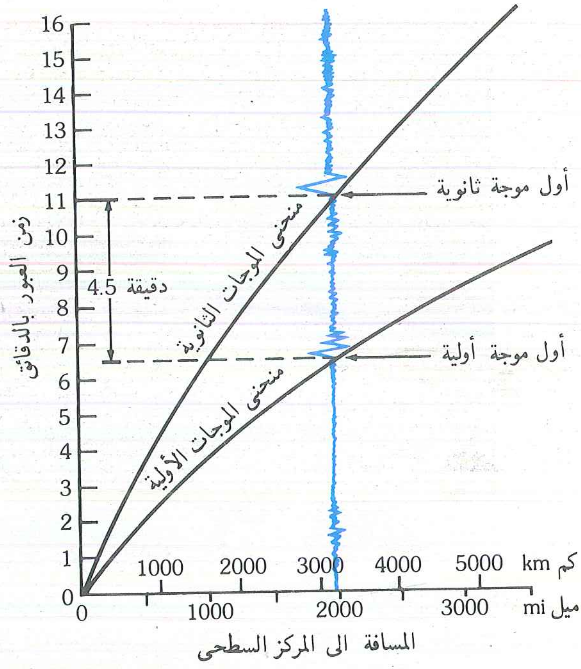
تحديد مصدر الزلازل

تذكّر أن البؤرة هى المكان الذى ينشأ فيه الزلزال عادة تحت سطح الأرض (شكل 14 ـ 12). **والمركز السطحى**، هو المكان الذى يعلو بؤرة الزلزال عند سطح الأرض.



شكل 14 ـ 12

تقع بؤرة معظم الزلازل على عمق ويعرف الموقع السطحى الذى فوق البؤرة مباشرة بالمركز السطحى للزلزال.



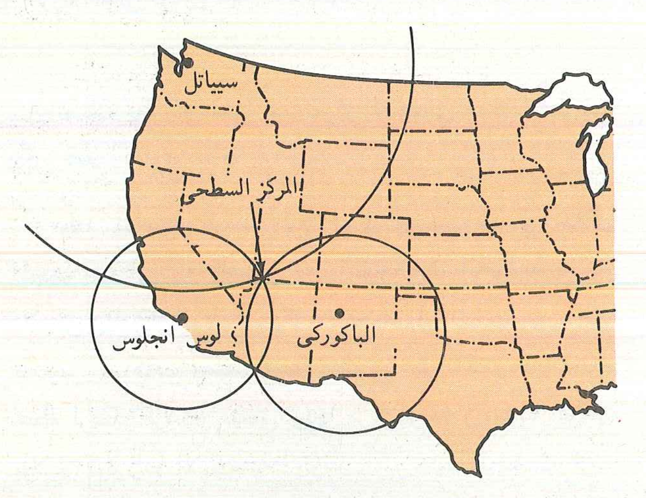
شكل 14 ـ 13

يستعمل رسم زمن العبور لتحديد بعد المركز السطحى للزلزال، والفرق بين زمنى الوصول لأول موجة أولية (و) وأول موجة ثانوية (ث) يساوى 4.5 دقيقة فى هذا الرسم. وبذلك يكون بعد المركز السطحى 3200 كيلومتر تقريبا.

ويزودنا الفرق بين سرعتى الموجات الأولية والموجات الثانوية بطريقة عملية لتحديد المركز السطحى للزلازل الضحلة. ويمكن تشبيه المبدأ المطبق بسباق بين سيارتين، أحداهما أسرع من الأخرى. وكلما زادت مسافة السباق زاد الفرق فى زمن الوصول عند نهاية السباق. ولذلك فكلما كان الفرق كبيرا بين زمن وصول الموجات الأولية والموجات الثانوية كلما زادت المسافة الفاصلة بين المركز السطحى للزلزال وموقع المرجفة التى سجلته.

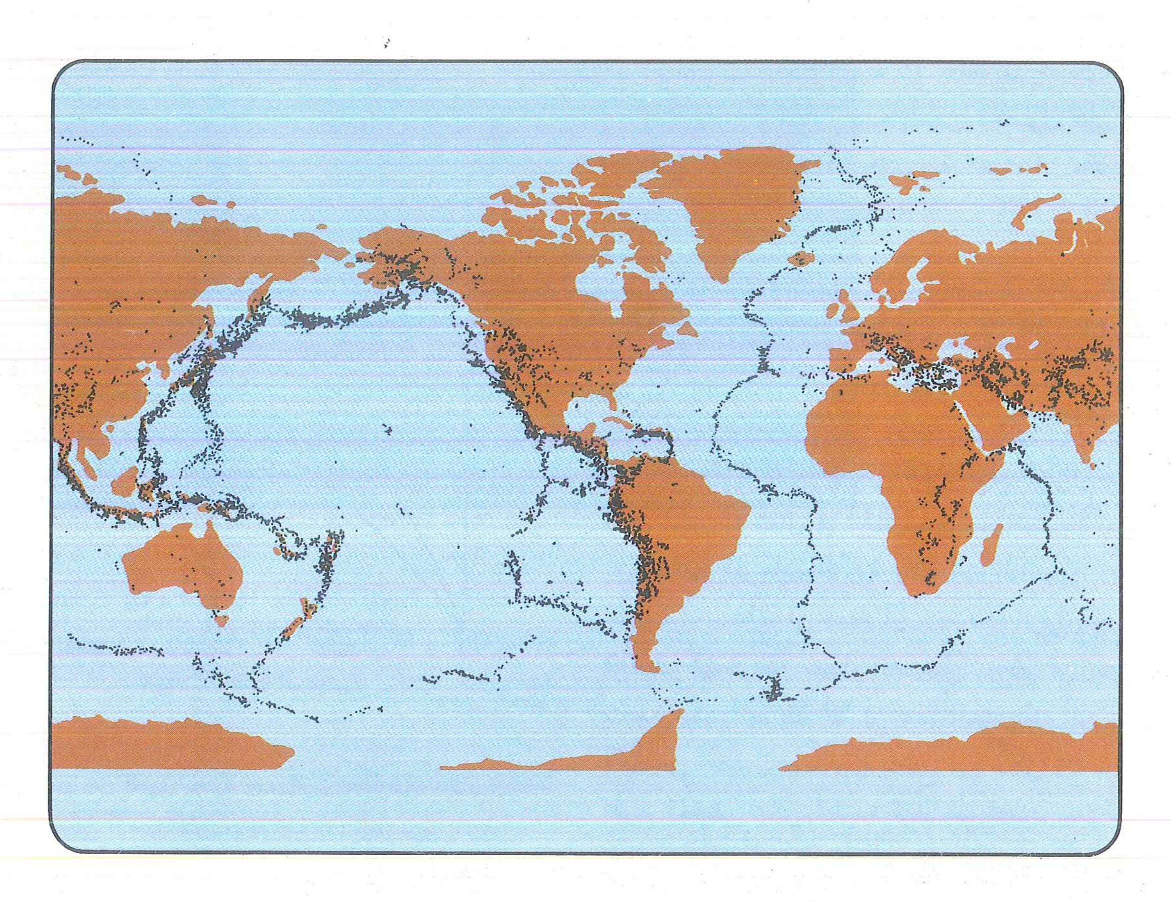
ولقد تم تطوير طريقة لتحديد مكان المركز السطحى للزلزال باستخدام سجلات اهتزازية من زلازل تم تحديد مركزها السطحى بسهولة من خلال أدلة واقعية. ومن هذه السجلات الزلزالية أمكن وضع رسومات لأزمنة الوصول، كما هو موضح فى شكل 14 ـ 13. ولقد تم تحسين الرسومات الأولى لزمن الوصول عندما أمكن الحصول على سجلات زلزالية من التفجيرات النووية، حيث أن مكان وزمان الانفجار معروفان بدقة مسبقا.

فباستعمال سجل الزلازل المبين فى شكل 14 ـ 11 ومنحنى أزمنة الانتقال الموضح فى شكل 14 ـ 13، نستطيع أن نحدد المسافة التى تبعد بها محطة التسجيل من موقع الزلزال. وبعد تحديد الفترة الزمنية بين الموجة الأولية الأولى والموجة الثانوية الأولى، يمكن تحديد موقع الزلزال على الرسم المبين لزمن الانتقال فى الخط الذى يبين امتدادا زمنيا مماثلا بين منحنى الموجات الأولية والموجات الثانوية. ومن هذه المعلومات نستطيع أن نحدد أن موقع هذا الزلزال يبعد مسافة 3300 كيلومتر من جهاز التسجيل. ورغم أن بعد الزلزال يتحدد بهذه الطريقة إلا أن هذا البعد يمكن أن يتخذ أى اتجاه من محطة الرصد. وكما يتضح من شكل 14 ـ 14، فان الموقع الحقيقى يمكن تحديده فقط بعد تحديد بعده من ثلاثة محطات مختلفة أو أكثر لا تقع على خط واحد. وبرسم دوائر



شكل 14 ـ 14

يتحدد موقع المركز السطحى للزلزال باستعمال الأبعاد الثلاثة التى أمكن الحصول عليها من ثلاثة محطات زلزالية.



شكل 14 ـ 15

التوزيع العالمى للزلازل خلال تسع سنوات.

يمثل نصف قطر كل منها بعد المركز السطحى لهذه المحطات، يمكن تحديد الموقع بدقة.

ولقد تم دعم دراسة الزلازل فى الستينات من خلال المجهودات المبذولة للتمييز بين التفجيرات النووية تحت الأرض والزلازل الطبيعية. فقد عمل المختصون على تأسيس شبكات رصد واسعة تحتوى على أكثر من 100 محطة لرصد الزلازل ينسق بينها مركز موحد فى مدينة قولدن بولاية كولورادو الأمريكية. وتوجد أكبر هذه المحطات قرب بيللنقز بولاية مونتانا. وهى تحتوى على منظومة بها 525 جهاز تسجيل زلزالى، مقسمة الى 21 مجموعة تغطى منطقة يبلغ قطرها 200 كيلومتر. وباستعمال هذه المنظومة يمكن تحديد المركز السطحى للزلزال بواسطة حاسبات إلكترونية سريعة وذلك بطريقة المحاولة والخطأ.

الأحزمة الزلزالية

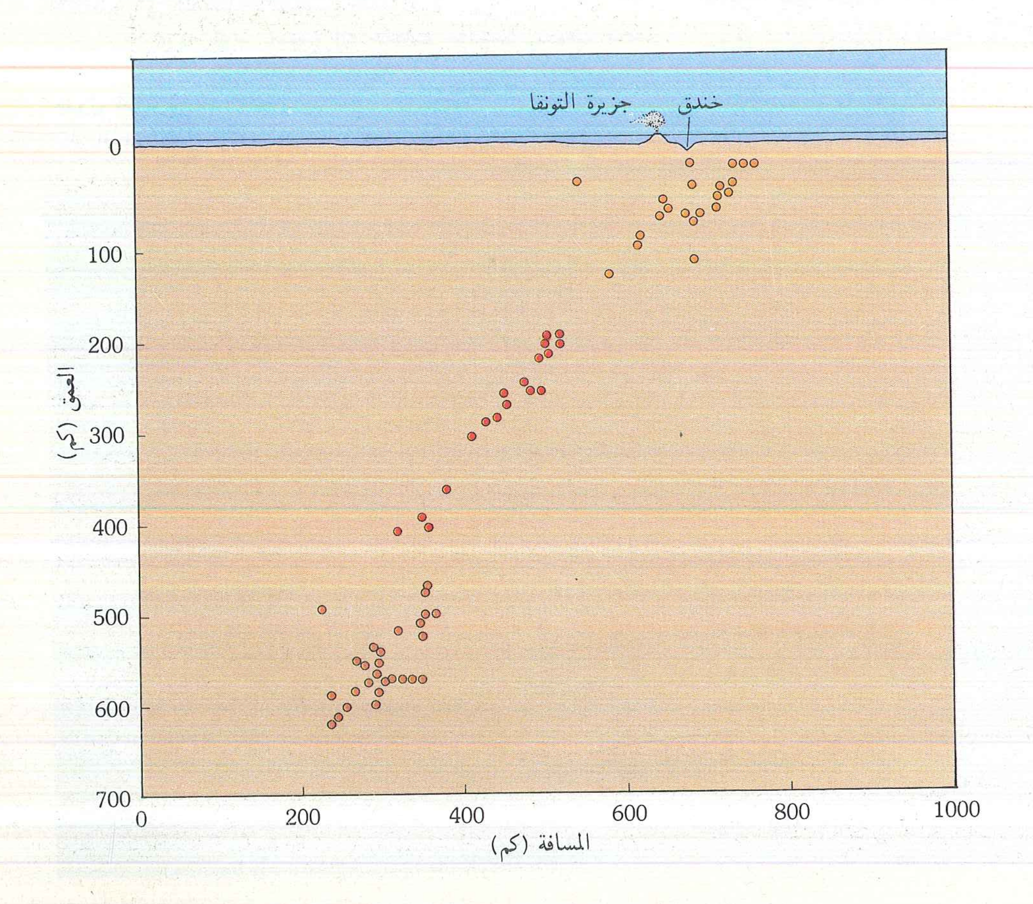
تتركز 95 % من الطاقة المحررة بواسطة الزلازل فى بضعة نطاقات ضيقة تطوق الكرة الأرضية (شكل 14 ـ 15). وينطلق أكبر مقدار من الطاقة فى ممر قرب الحافة الخارجية للمحيط الهادى يعرف بالحزام المطوق للمحيط الهادى. ويشمل هذا الحزام مناطق ذات زلازل شديدة مثل اليابان والفليبين وشيلى وعدد من سلاسل الجزر البركانية والتى تمثلها الجزر الأليوشية. وهناك منطقة أخرى يتركز فيها

النشاط الزلزالى القوى تمتد عبر المناطق الجبلية المحاذية للبحر المتوسط عبر ايران وشرقها الى مركّب جبال الهيمالايا. ويشير شكل 14 ـ 15 الى وجود حزام آخر مستمر يمتد آلاف الكيلومترات عبر محيطات العالم. ويتوافق النطاق مع نظام مرتفعات وسط المحيطات التى تمثل منطقة نشاط زلزالى متكرر ولكنه ضعيف الحدة.

أعماق الزلازل

يتضح من دراسة السجلات الاهتزازية أن الزلازل تنشأ عند أعماق تتراوح بين 5 و 100 كيلومتر، وبطريقة مصطلح عليها، تم تصنيف بُؤر الزلازل حسب العمق الذى تحدث عنده. فالزلازل التى تنشأ عند أعماق لا تزيد عن 60 كيلومترا من سطح الأرض تعرف بأنها زلازل ضحلة. أما التى تنشأ بين 60 و 300 كيلومتر فتعتبر زلازل متوسطة. بينما تصنف الزلازل التى تقع بؤرها عند أعماق تزيد على 300 كيلومتر بأنها عميقة. ويقع حوالى 90 % من الزلازل عند أعماق تقل عن 100 كيلومتر. ويبدو أن جميع الزلازل القوية تنشأ عند أعماق ضحلة. فمثلا، فى زلزال 1906 بسان فرانسيسكو، شملت الحركة الخمسة عشر كيلومترا العليا للقشرة الأرضية، فى الوقت الذى كان لزلزال 1964 بألاسكا بؤرة عند عمق 33 كيلومترا. ويتضح من المعلومات الاهتزازية أن الزلازل ذات البؤر الضحلة قد وصلت حوالى 8.6 على مقياس ريختر. بينما كانت شدة أقوى الزلازل المتوسطة تحت 7.5 . أما الزلازل ذات البؤر العميقة فلم تتجاوز 6.9 فى مقدارها.

وعند رسم معلومات الزلازل حسب موقعها الجغرافى وعمقها، يمكن الحصول على عدة ملاحظات قيمة. فبدلا من



شكل 14 ـ 16

توزيع بؤر الزلازل سنة 1965 حول جزيرة التونقا.

التوزيع العشوائى للزلازل الضحلة والعميقة، يتضح وجود نمط محدد لهذا التوزيع. فقد وجد أن الزلازل التى تقع على امتداد نظام مرتفعات وسط المحيطات لها بؤر ضحلة دائما. وهى عموما زلازل ضعيفة. كما لوحظ أيضا أن كل الزلازل عميقة البؤر تقع فى الحزام المطوق للمحيط الهادى وعلى الأخص فى المناطق التى تقع فى اتجاه اليابسة من خنادق المحيط العميقة. ففى دراسة قام بها بينيوف فى الجنوب الغربى للمحيط الهادى قرب خندق التونغا، اكتشف أن أعماق البؤر تزداد مع زيادة المسافة من الخندق كما هو موضح فى الشكل 14 ـ 16. وتأخذ هذه المناطق الزلزالية التى تسمى **نطاقات بينيوف** نسبة الى الرجل الذى اهتم بدراستها، اتجاها يميل 45° مع سطح الأرض. لماذا تحدث الزلازل على امتداد نطاق ضيق يغوص حوالى 700 كيلومتر فى أعماق الأرض؟ سوف نتناول هذا السؤال بشىء من التفصيل فى الفصل السادس عشر.

شدة الزلازل ومقدارها

اعتمدت المحاولات الأولى لتقدير شدة الزلازل على وصف الحادثة نفسها. ومن الواضح أن لهذه الطريقة مشاكلها. إذ تتفاوت تقديرات البشر تفاوتا كبيرا مما يجعل تصنيف شدة الزلازل أمرا صعبا للغاية. ثم استحدث العالم جوذيبى ميركاللى سنة 1902 تدريجا موثوقا به الى حد كبير، يعتمد على كمية الدمار الذى يلحق بأنواع مختلفة من هياكل المبانى. وتستعمل هذه الطريقة فى عدد من دول العالم (جدول رقم 14 ـ 1). ولكن الدمار الذى تسببه الزلازل لا يعد وسيلة ملائمة للمقارنة. فهناك عدة عوامل تسبب تفاوتا فى مقدار الضرر من بينها بعد المركز السطحى وطبيعة المواد السطحية وتصميم المبانى. هذا بالاضافة الى أن كثيرا من المراكز السطحية للزلازل لا يتوافق موقعها مع المناطق المأهولة بالسكان فى العالم. وقد أدى ذلك الى وضع طرق

جدول 14 ـ 1

سلم الشدة المعدل لمركالى

1 ـ لا يحس به الا القليل جدا وتحت ظروف ملائمة.

2 ـ يحس به القليل عند الراحة وعلى الأخص فى الأدوار العليا للمبانى.

3 ـ يحس به الكثير فى داخل المبانى وعلى الأخص فى الأدوار العليا للمبانى ولكن الكثير منهم لا يصنفه كزلزال.

4 ـ خلال النهار، يحس به الكثيرون داخل المبانى والقليل خارج المبانى فيشعرون بما يشبه اصطدام سيارة شاحنة بمبنى اسمنتى.

5 ـ يشعر به كل إنسان تقريبا. يصحى الكثير من نومهم ـ تهتز الأشجار وجميع الأشياء التى لها ارتفاع كبير.

6 ـ يشعر به الجميع والكثير يهرعون خوفا الى خارج المبانى. كما يحرك الأثاث الثقيل، كما تسجل حالات لتساقط الطلاء وتسلخ جدران المداخن.

7 ـ يهرع الجميع خارج المبانى، دمار محدود للمبانى ذات التصميم الجيد. ودمار قليل أو متوسط للمبانى العادية ودمار كبير للمبانى ذات التصميم الردىء أو البناء الضعيف.

8 ـ الدمار طفيف فى المبانى جيدة التصميم وكبير فى المبانى العادية مع التحطم الجزئى وعظيم فى المبانى ذات البناء الردىء (سقوط المداخن، واعمدة المصانع، والدعامات والنصب التذكارية والجدران).

9 ـ الدمار كبير جدا فى المبانى جيدة التصميم ـ ازاحة المبانى عن قواعدها، تشقق واضح فى الأرض.

10 ـ دمار بعض المبانى الخشبية، دمار معظم المبانى الصخرية والقوالب مع قواعدها، تشقق كبير فى الأرض.

11 ـ قليل من المبانى الصخرية تبقى قائمة، تتحطم الجسور، شروخ واسعة فى الأرض.

12 ـ الدمار شامل، يتم رؤية الموجات على سطح الأرض أثناء الزلزال. تتناثر الأشياء عاليا فى الهواء.

جدول 14 ـ 2

درجات الزلازل واحتمالية حدوثها عالميا

العدد المقدر سنويا	آثار الزلزال	درجات مقدار ريختر
900,000	عادة لا نحس به ولكن يمكن تسجيله	3.5 >
30,000	كثيرا ما نحس به ولكن الدمار الذى يحدثه قليل.	3.5 ـ 5.4
500	دمار طفيف للانشاءات	5.5 ـ 5.0
100	قد يكون مدمرا فى المناطق المأهولة بالسكان	6.1 ـ 6.9
20	زلازل كبيرة ذات آثار مدمرة	8 =
واحدة فقط كل 5 ـ 10 سنوات	زلازل عظيمة تسبب دمارا شاملا لكل المواقع المأهولة القريبة	

لتحديد كمية الطاقة المحررة اثناء الزلزال ويعبر عن هذا القياس بالمقدار.

ومثاليا، يمكن تحديد مقدار الزلزال من كمية المواد المنزلقة على امتداد فالق، ومن المسافة التى تنزاح بها هذه المواد. وحتى فى أحسن الظروف مثل ما هو موجود فى زلزال 1906 بسان فرانسيسكو حيث يظهر خط الفالق، وحيث يمكن قياس الازاحة من أدلة طبيعية، فان هذه الطريقة لا توفر الا تقديرات تقريبية للقوى المؤثرة. وفى كثير من الزلازل لا تصل آثار الصدوع الى السطح، ولذلك فانه لا يمكن قياس مقدار الازاحة مباشرة. وفى سنة 1935 حاول تشارلز ريختر بمعهد كاليفورنيا للتقنية أن يصنف زلازل جنوب كاليفورنيا الى مجموعات ذات مقدار كبير ومتوسط وصغير. ويحدد النظام، الذى طوّره، مقادير الزلازل من الحركات التى تقاس بالأجهزة الاهتزازية.

ويستعمل اليوم سلم ريختر المحسّن بكثرة لوصف مقدار الزلزال. ويتم حساب المقدار على هذا السلم بقياس مقدار أكبر موجة فى سجل المرجفة. ورغم أن المراجف تضخم بشدة حركة الأرض، فان الزلازل ذات المقدار الكبير سوف تحرك قلم التسجيل مسافة أبعد من الزلازل ذات المقدار الصغير. ولكى تكون محطات التسجيل صالحة لتسجيل نفس المقدار فى جميع أنحاء العالم لزلزال معين فان تعديلات يجب أن تتم لتحسين الموجات الزلزالية المتضعفة بعد خروجها من البؤرة إلى جانب ضبط حساسية جهاز التسجيل. وقد اعتمد ريختر مائة كيلومتر كمسافة قياسية كما اعتمد جهاز وود اندرسون كجهاز تسجيل قياسى.

ولقد بلغ مقدار أقوى زلزال حتى الآن حوالى 8.6 على مقياس ريختر. فقد اطلقت هذه الصدمات القوية ما مقداره 10^{26} إرج من الطاقة. وهذا يساوى تقريبا تفجير بليون طن من مادة ت. ن. ت. ويبدو أنه لم يقع أى زلزال يزيد مقداره عن 9 . وبالمقابل فان الزلازل التى يقل مقدارها عن 3.5 على مقياس ريختر لا يشعر بها الانسان. أما بعد تطوير أجهزة تسجيل ذات حساسية أكبر، فقد أمكن تسجيل زلازل يساوى مقدارها (2). ويوضح جدول 14 ـ 2 العلاقة بين مقدار الزلازل وآثارها.

وكما رأينا سابقا فان الزلازل تختلف كثيرا فى قوتها، ولذلك فان ارتفاعات الموجات المولدة تتفاوت بآلاف المرات تبعا لهذا الاختلاف. ومن أجل استيعاب هذا التفاوت الكبير فقد استعمل ريختر مقياسا لوغاريثميًا للتعبير عن المقدار. وعلى هذا المقياس إذا تضاعف ارتفاع الزلزال عشر مرات فان ذلك يقابله زيادة وحدة واحدة على مقياس المقدار.

جدول 14 ـ 3 بعض زلازل العالم المشهورة

السنة	الموقـع	عدد الموتى	درجة الزلزال	ملاحظات
1290	شهلي (هوبي)، الصين	100,000		
1556	شينسي، الصين	830,000		ربما كانت أكبر الكوارث الطبيعية
1737	كلكتا، الهند	300,000		
1755	لشبونة، البرتغال	70,000		دمار كبير للتسونامى
1811 ـ 12	مدريد الجديدة، ولاية ميزورى	قليل		ثلاثة زلازل كبيرة
1886	كارلستون، جنوب كارولينا	60		
1906	سان فرانسيسكو، كاليفورنيا	700	8.25	سببت الحرائق دمارا كبيرا
1908	مسينا، ايطاليا	120,000	7.5	
1920	كانسو، الصين	180,000	8.5	
1923	طوكيو، اليابان	150,000	8.2	سببت الحرائق دمارا كبيرا
1960	جنوب شيلى	5,700	8.7 ـ 8.5	ربما يكون أكبر زلزال تمّ تسجيله حتى الآن.
1964	ألاسكا	131	8.6 ـ 8.4	
1970	بيرو	66,000	7.8	تهور صخرى كبير
1971	سان فرناندو، كاليفورنيا	65	6.5	زادت الخسائر عن 500 مليون دولار
1975	اقليم لياؤنينج، الصين	قليل	7.5	أول زلزال قوى يتم التنبؤ به
1976	تانجشان، الصين	650,000	7.6	لم يتم التنبؤ به

ولذلك فان ارتفاع أكبر موجة سطحية لزلزال مقداره 5 هو أكبر عشر مرات من ارتفاع موجة ناشئة عن زلزال مقداره 4. وعلاوة على ذلك فان زيادة وحدة واحدة فى المقدار على مقياس ريختر يعادلها تقريبا زيادة ثلاثين ضعفا من الطاقة المنطلقة. ولذلك فان أى زلزال مقداره 6.5 يطلق طاقة أكبر ثلاثين مرة من الطاقة المحررة لزلزال مقداره 5.5 وأكبر تسعمائة مرة من الطاقة لزلزال مقداره 4.5. فالزلزال الكبير الذى مقداره 8.5 يطلق طاقة أكبر ملايين المرات من أصغر زلزال يشعر به الانسان. وهذا يجب أن يبدد الشعور القائل بأن الزلازل المتوسطة القوة تقلل من فرصة وقوع زلازل قوية فى نفس المنطقة، حيث أن الطاقة المنطلقة من زلزال واحد قوى تساوى الطاقة المنطلقة من آلاف الزلازل.

وفى جدول 14 ـ 3 قائمة لبعض الزلازل الرئيسة فى العالم ومقاديرها على مقياس ريختر. ومن المتوقع أن تحدث مثل هذه الزلازل الكبيرة فى المناطق ذات النشاط الحركى كل 50 الى 200 سنة. فمنطقة فالق سان أندرياس الذى تسبب فى زلزال سان فرانسيسكو عام 1906 لم تشهد أى زلزال كبير منذ أكثر من 75 عاما. ويعد ذلك احصائية مزعجة لسكان هذه المنطقة.

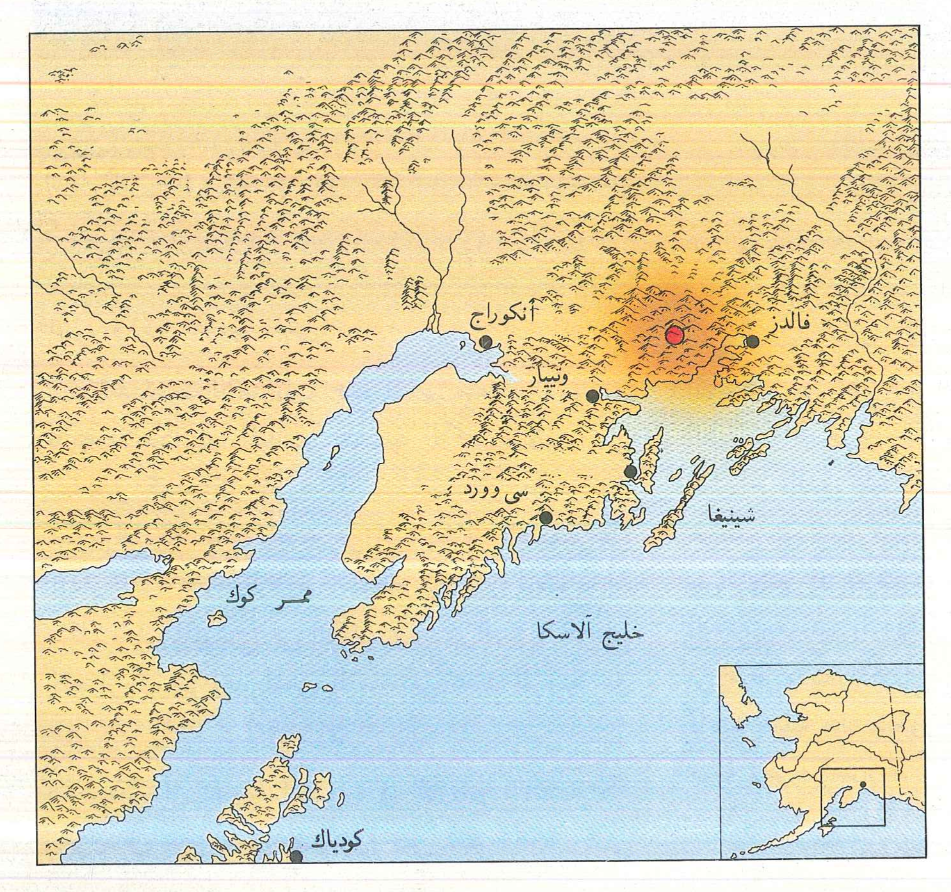
وتظهر الدراسات الحديثة أن مقياس ريختر لا يفرق بدقة بين الزلازل التى لها مقادير كبيرة جدا. وحيث أن جميع الزلازل القوية جدا لها موجات ذات ارتفاعات متساوية تقريبا، فان مقياس ريختر يصل الى درجة التشبع فى هذا المستوى. ونتيجة لذلك فقد تم اقتراح طرق لتعديل مقياس

ريختر بحيث يستطيع قياس مقادير الزلازل الكبيرة بدقة. وتحلل احدى هذه الطرق الموجات الاهتزازية الطويلة جدا لهذا الغرض. وعلى هذا المقياس المطوّل يمكن القول بأن زلزال سان فرانسيسكو لسنة 1906 م، ذا الموجة السطحية البالغ مقدارها 8.3 ستصبح 7.9. أما زلزال آلاسكا لسنة 1964 م ذو المقدار البالغ 8.4 الى 8.6 سيزداد الى 9.2 باستعمال هذا النظام. أما أعتى زلزال فهو ذلك الذى حدث بشيلى سنة 1960 م بمقدار 9.5.

دمـار الزلازل

كان أعتى زلزال أصاب أمريكا الشمالية فى هذا القرن هو زلزال الجمعة المباركة (قودفرايداى) بألاسكا الذى حدث عند الساعة 5:36 من مساء يوم 27 ـ 3 ـ 1964 م. وقد بلغ مقدار هذا الزلزال الذى شعر به سكان جميع مناطق الولاية 8.4 ـ 8.6 على مقياس ريختر. ودام لمدة 3 ـ 4 دقائق. وخلال هذه المدة القصيرة، لقى مائة واربعة عشر شخصا حتفهم وآلاف صاروا بدون مأوى. وقد لحقت أضرار كبيرة باقتصاد الولاية (شكل 14 ـ 17). ولو كانت المدارس مفتوحة لكانت الاصابات أكثر بالتأكيد. وقد قدرت الخسارة المادية بمبلغ 300 مليون دولار. ويوضح شكل 14 ـ 17 المركز السطحى للزلزال والمدن التى كان تأثيره عليها بالغا. وقد تم تسجيل 28 رَجّة تلوية خلال 24 ساعة من الهزة الأصلية زاد مقدار عشرة منها عن 6 درجات على مقياس ريختر.

وتحدد عدة عوامل كمية الدمار الذى يصاحب أى زلزال. واوضح هذه العوامل هى مقدار الزلـزال وقربـه من المناطق المسكونة. ولحسن الحظ فان معظم الزلازل صغيرة وتحدث فى المناطق النائية من سطح الأرض، ولكن يتم



شكل 14 ـ 17
المنطقة التى تأثرت بزلزال ما يعرف بالجمعة المباركة، 1964 . لاحظ موقع المركز السطحى (البقعة الحمراء).

الاعلان سنويا عن حوالى 20 زلزالا رئيسا من بينها واحد مدمر أو اثنان على الأكثر.

وأثناء حدوث أى زلزال، تشهد المنطقة الواقعة فى حدود 20 ـ 50 كيلومترا من مكان الصدع، نفس الدرجة من اهتزاز الأرض. ويتناقص الاهتزاز بسرعة فى المناطق الأبعد من ذلك. وفى بعض الحالات، خلال الزلازل ذات العنف المتميز مثل زلزال مدريد الجديدة لسنة 1811 ، حيث كانت منطقة التأثر أكبر بكثير. أما المركز السطحى لذلك الزلزال فيقع مباشرة جنوب مدينة القاهرة بولاية الينوى. وقد شعر السكان به من خليج المكسيك جنوبا حتى كندا شمالا ومن جبال الروكى غربا حتى شاطىء المحيط الأطلسى شرقا.

الدمار الذى تسببه الموجات الاهتزازية

لقد زود زلزال الأسكا لسنة 1964، الجيولوجيين بمفاهيم جديدة عن دور الاهتزازات الأرضية كقوة مدمرة. فبينما تنتقل الطاقة المنطلقة أثناء الزلزال على امتداد سطح الأرض، فانها تسبب اهتزازات فى الأرض بطريقة معقدة فتحركها الى أسفل والى أعلى. هذا الى جانب تحركها يمنة ويُسرةً. وتعتمد كمية الدمار التى تسببها الاهتزازات على عدة عوامل: (1) حدة ومدة الاهتزازات. و (2) طبيعة المواد التى يقع عليها المبنى. و (3) تصميم المبنى.

ولقد دمرت الاهتزازات جميع المبانى متعددة الأدوار فى مدينة الاسكا. أما المبانى الخشبية الأكثر مرونة التى تستعمل كمساكن فقد كانت أحسن حظا. وفى شكل 14ـ18 مثال واضح عن أثر اختلاف التصميم على الدمار الذى تحدثه الزلازل. نستطيع أن نرى بوضوح أن هيكل المبنى المصنوع من الصلب فى يسار الصورة قد قاوم الاهتزازات، بينما انهار المبنى الاسمنتى عديم المرونة عن آخره.

ويمكن أن تعزى الخسارة فى الأرواح الناشئة عن الزلزال الى نوع المبنى المسكون. ففى سنة 1556، لقى حوالى 830,000 نسمة حتفهم بإقليم شلنس بالصين عندما حطم زلزال فى الصباح الباكر المنطقة بأسرها. وكان الكثير من السكان يقطنون مساكن حفرت فى رواسب رياحية دقيقة الحبيبات تسمى رسوبيات الغرين (أنظر الفصل الثانى عشر). فقد تهاوت جدران هذه المبانى تاركة السقوف تردم سكانها. كما أن ازدحام السكان مع الطرق الحالية المتبعة فى بناء المساكن فى هذه المنطقة يجعلان احتمال تكرار حادثة 1556 أمراً ممكناً.

لقد لحق الضرر بمعظم المبانى الكبيرة فى مدينة انكوراج بألاسكا رغم أنه روعى فى بنائها مطابقتها لمواصفات مبانى الزلازل الصادرة عن نظام المبنى الموحد لولاية كاليفورنيا. وقد يرجع الدمار المكثف الى الفترة الطويلة غير العادية التى استغرقها الزلزال والتى قدرت بحوالى 3 ـ 4 دقائق. وتتكون معظم الزلازل من رجات تدوم 20 ثانية الى دقيقة واحدة. تذكّر أن زلزال 1906 فى سان فرانسيسكو قد استمر ما يقارب من 40 ثانية.

وتتعرض المنطقة الواقعة فى نطاق 20 ـ 50 كيلومترا من المركز السطحى للزلزال لنفس الدرجة تقريبا من الاهتزاز الأرضى ولكن هناك تفاوت كبير فى درجة الدمار داخل هذه المنطقة ويرجع هذا التفاوت بشكل رئيسى الى طبيعة الأرض التى أسست عليها المبانى. فمثلا تعمل الرواسب غير المتماسكة، على تضخيم الاهتزازات الى درجة أكبر من الطبقات الصخرية. ولذلك فان المبانى الواقعة فى مدينة انكوراج والتى بنيت فوق رسوبيات غير متصلبة، قد تعرضت الى دمار كبير. وعلى العكس من ذلك فان معظم مدينة وتيير قد تعرضت لدمار أقل من جراء الموجات الاهتزازية، رغم وقوعها فى منطقة أقرب الى المركز السطحى من موقع مدينة انكوراج، وذلك لأن مدينة وتيير تقع على قاعدة صلبة من صخور الجرانيت. ومع ذلك فقد دمرتها موجة بحرية اهتزازية.

لقد أثر هذا الزلزال فى مناطق تبعد آلاف الكيلومترات



شكل 14 ـ 18

الدمار الذى لحق بمبنى شركة جى. سى بينى المكون من خمسة طوابق بمنطقة انكوراج ـ آلاسكا. قليل جدا من الدمار لحق بالمبانى المجاورة.

من المركز السطحى حيث جعل الأرض تهتز كما لو كانت شوكة رنانة ضخمة. وقد تسببت الموجات الأرضية المضخمة فى **الارتطام الايقاعى للماء** (سيشِس)، فى البحيرات والخزانات والأحواض المغلقة فى مناطق يتجاوز بعدها خليج المكسيك. ففى بحار ساحل تكساس حطمت موجة ارتفاعها متران قاربا صغيرا بينما لوحظ تكون موجات أصغر فى أحواض السباحة فى كل من ولايتى تكساس ولويزيانا.

وتعتبر السيشس خطيرة فى بحيرات المياه المتجمعة خلف السدود الترابية. وقد عرف عن هذه الموجات بأنها ترتطم بجدران الخزانات وتضعف قوة هيكلها وبذلك تهدد حياة السكان القاطنين فى الوادى أسفل هذه الخزانات. ومن الآثار الأخرى القوية، تقلّب سطح الماء فى الآبار استجابة للاهتزازات الكبيرة. فأثناء هذا الزلزال ظهرت آثار الاهتزازات فى آبار عديدة على طول المنطقة الواقعة بين

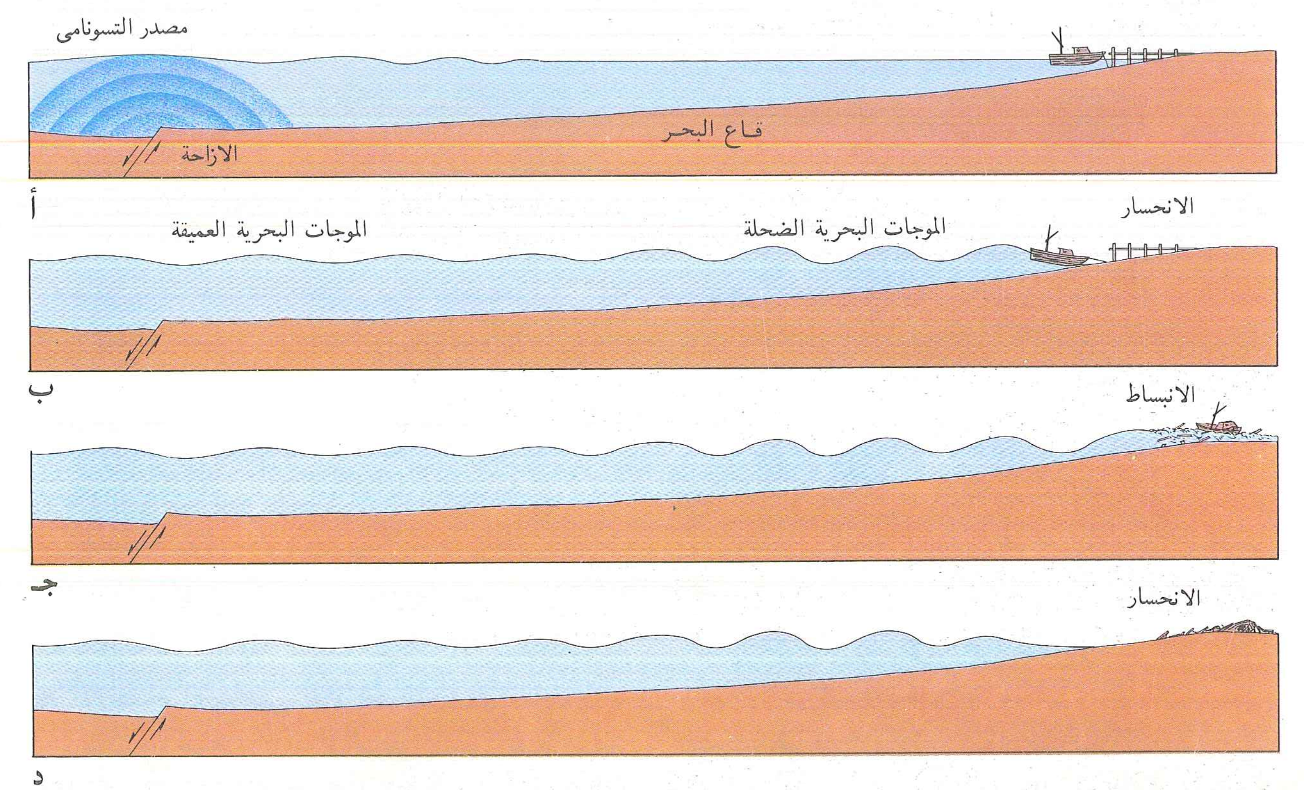
ولايتى داكوتا الجنوبية فى الغرب وجورجيا فى الشرق. وقد بلغ أقصى تقلب فى مستوى المياه 3.5 مترا.

الموجات البحرية الاهتزازية (التسونامى)

لقد كان سبب معظم الوفيات المصاحبة لزلزال ألاسكا سنة 1964 هو **الموجات البحرية الاهتزازية**، أى **التسونامى**. وقد كانت هذه الأمواج المدمرة تعرف بموجات المد والجزر، ولكن هذه التسمية غير مناسبة لأن هذه الموجات لا تنشأ عن تأثير المد والجزر الذى يسببه القمر أو الشمس.

فمعظم أنواع التسونامى تنتج عن الازاحة الرأسية لقاع المحيطات أثناء الزلزال كما هو موضح فى شكل 14 ـ 19. وتشبه التسونامى عند تكونها الموجات الناتجة عن رمى حصاة فى بركة ماء. وعلى خلاف التموجات فان التسونامى يتقدم بسرعة تتراوح بين 500 و 800 كيلومتر فى الساعة. وبالرغم من هذه الصفة المميزة فالتسونامى قد يمر بعرض المحيط دون أن يشعر به أحد لأن ارتفاع موجاته عادة يقل عن المتر والمسافة بين ذروتى موجاته تتراوح بين 100 و 700 كيلومتر. ولكن بعد دخول هذه الموجات المدمرة الى المياه الشاطئية الضحلة، تنخفض سرعتها وتبدأ مياهها فى التراكم فوق بعضها الى ارتفاع يزيد أحيانا عن 30 مترا. ويظهر التسونامى عند وصوله الى الشاطىء كارتفاع مفاجىء فى مستوى سطح الماء مع تعكر فى مياهه وعدم انتظام سطحه.

وأول علامات التسونامى عادة هو الانحسار السريع لمياه البحر بعيدا عن الشواطىء (شكل 14 ـ 19). ولقد



شكل 14 ـ 19

رسم توضيحى لموجات التسونامى التى يسببها انزلاق فى قاع المحيط. حجم التموجات وابعادها ليست مقاسة بنفس مقياس الرسم.

تعود قاطنوا الشواطىء أن يستجيبوا لهذا التحذير بترك مساكنهم والانتقال الى مناطق مرتفعة. إذ بعد حوالى خمسة الى ثلاثين دقيقة يتبع انحسار المياه موجة عارمة قادرة على تغطية مئات الأمتار من الأرض المجاورة للشاطىء. وبشكل متتابع فان كل موجة يتلوها تراجع سريع للمياه فى اتجاه المحيط. وهذه الموجات التى تفصلها عن بعضها البعض فترات تتراوح بين 10 دقائق و 60 دقيقة، القدرة على قطع مساحات شاسعة من مياه المحيطات قبل أن تخمد طاقتها تماما. فقد قطعت موجة التسونامى الناشئة عن زلزال تشيلى سنة 1960 مسافة 17,000 كيلومتر عبر المحيط الهادى حتى وصلت اليابان. هذا الى جانب التدمير الذى أصاب القرى الشاطئية الواقعة على رقعة تمتد 800 كيلومتر من شاطىء أمريكا الجنوبية، حيث لحق دمار كبير بالقرى الواقعة على الشاطىء الجنوبى لجزيرة هونشو اليابانية. وذلك بعد وقوع الزلزال بحوالى 22 ساعة. وقد سجلت أجهزة قياس المد والجزر بجزيرة أهيلو ـ هاواى، ولعدة أيام لاحقة، هذه الأمواج المتناقصة فى قوتها أثناء تلاطمها عبر المحيط الهادى.

أما موجة التسونامى التى ولّدها زلزال ألاسكا سنة 1964 فقد أوقعت دمارا كبيرا فى المناطق السكنية القريبة من خليج ألاسكا. كما دمرت مدينة تشينيقا عن آخرها. كذلك حل دمار كبير بمدينة كودياك كما هلكت معظم سفن اسطول الصيد بها عندما حملت موجة بحرية اهتزازية أعدادا من سفنه الى الحى التجارى بالمدينة (شكل 14 ـ 20). وقد بلغ عدد ضحايا التسونامى 107 شخصا فى الوقت الذى بلغ فيه عدد ضحايا الزلزال فى مدينة انكوراج 9 أشخاص فقط كنتيجة مباشرة للاهتزازات. ولقد امتد الدمار عقب زلزال ألاسكا الى معظم مناطق الشاطىء الغربى لقارة أمريكا الشمالية. ورغم أن انذارا قد سبق

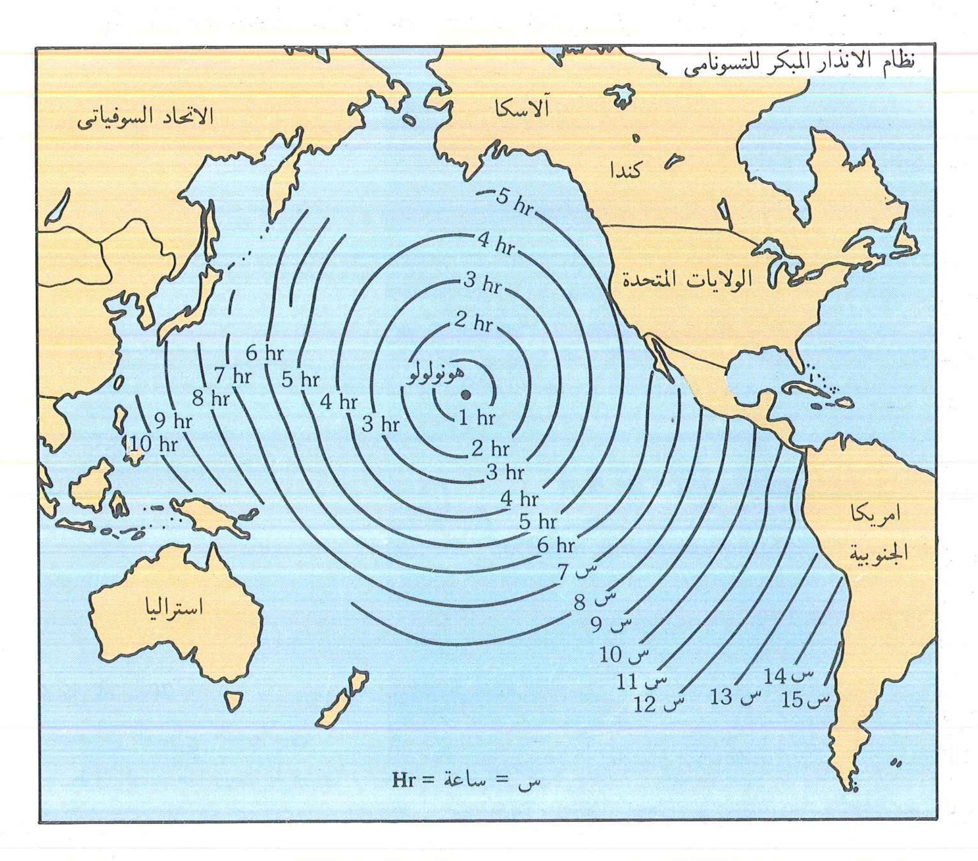


شكل 14 ـ 20
عصفت أمواج التسونامى بأسطول الصيد هذا ورمت به فى قلب قرية كودياك بآلاسكا.

الحادثة بساعة فقد هلك 12 شخصا فى مدينة كريسًانت بولاية كاليفورنيا حيث زهقت كل هذه الأرواح وحدث معظم الدمار بسبب الموجة الخامسة. فقد ارتفعت الموجة الأولى 4 أمتار فوق الجزر وقد لحقتها ثلاثة موجات متدرجة فى الصغر وظن الناس أن موجة التسونامى قد هدأت فعادوا الى الشاطىء حيث قابلتهم الموجة الخامسة التى كانت أكثر تدميرا والتى توافقت مع موجة المد مما جعلها ترتفع 6 أمتار فوق مستوى الجزر.

ورغم أن معظم موجات التسونامى تولّدها الزلازل إلاَّ أن بعض أنواعها المدمرة قد تنشأ عن اندلاع البراكين. فقد ولد انفجار بركان كاراكاتوًا سنة 1883 موجة التسونامى التى أغرقت ما يقدر بحوالى 36,000 شخص من سكان جزيرتى جاوة وسومطرة.

وفى عام 1946 ضربت موجة تسونامى ضخمة جزر هاواى دون سابق انذار وقد تركت الموجة التى بلغ ارتفاعها 15 مترا عدة قرى ساحلية فى خراب، مما دفع مصلحة مساحة الأراضى والسواحل لاستحداث نظام الانذار المبكر للتسونامى فى المناطق الساحلية الواقعة على شاطىء المحيط الهادى. فمن مراصد الزلازل فى المنطقة ترسل تقارير عن الزلازل الكبيرة الى مركز الانذار المبكر للتسونامى بمدينة هونولولو. ويمكن تحديد ماهية الموجات الناشئة باستخدام أجهزة قياس المد والجزر. وخلال ساعة يمكن بث التحذيرات اللازمة. ورغم انتقال موجات التسونامى بسرعة كبيرة، فان هناك وقت كافٍ لاخلاء كل المناطق عدا المنطقة الواقعة حول المركز السطحى للزلازل (شكل 14 ـ 21). فموجات التسونامى المتولدة عند الجزر الأليوتشية مثلا تستغرق حوالى 5 ساعات للوصول الى هاواى وتلك المتولدة قرب شاطىء شيلى تستغرق 15 ساعة قبل أن تصل الى هاواى. ولحسن الحظ لا ينتج عن معظم الزلازل موجات تسونامى. وفى المتوسط فان هناك حوالى 1.5 تسونامى مدمرة تتكون فى



شكل 14 ـ 21
الخطوط تمثل مستويات أزمنة العبور لموجات التسونامى الى هونولولو بجزر هاواى من مواقع مختلفة فى المحيط الهادى.

مواقع مختلفة من العالم كل سنة. وموجة واحدة فقط فى عشر سنوات تصل الى مستوى الكارثة.

الحرائق

لقد تسبب زلزال ألاسكا سنة 1964 فى حرائق محدودة. ولكن غالبا ما تكون الحرائق اكثر دمارا. اذ يذكرنا زلزال 1906 فى سان فرانسيسكو بالتهديد الخطير للحرائق. فقد احتوى مركز المدينة على مبانى من الخشب والآجر. ورغم الدمار الكبير الذى لحق عددا من المبانى غير المسلحة الا أن الدمار الأكبر قد نشأ عن عدد كبير من الحرائق التى شبت عندما تحطمت خطوط الغاز وانقطعت خطوط الكهرباء. وقد اشتعلت النيران دون سيطرة لمدة ثلاثة أيام وأحرقت ما يربو عن 500 مجموعة سكنية من المدينة (شكل 14 ـ 2). ومما زاد الأمر تعقيدا الاهتزاز الأولى للأرض الذى قطع انابيب المياه بالمدينة فى مئات من المواقع.

وقد تم اخماد النيران عندما نسف عدد من المبانى على امتداد طريق رئيسى بالمدينةكحاجز ضد امتداد النيران. ورغم أن الخسارة فى الأرواح بسبب النيران كانت قليلة هذه المرة، فهى لم تكن كذلك دائما، فقد حدث زلزال فى اليابان سنة 1923 تسبب فى 250 حريقا اكتسحت مدينة يوكوهوما، ودمرت اكثر من نصف المبانى السكنية فى مدينة طوكيو. وقد زادت الوفيات بسبب الحرائق التى نشرتها رياح عاتية عن 100,000 نسمة.

الانهيارات الأرضية وهبوط سطح الأرض

أثناء زلزال ألاسكا سنة 1964، لم تكن الهزات الأرضية سببا مباشرا فى الدمار الشامل الذى أصاب المبانى، بل حدث ذلك نتيجة للانهيارات الأرضية والهبوط فى سطح الأرض الذى سبَّبته هذه الاهتزازات. فقد سبب الاهتزاز الشديد فى منطقة فالديز و سى وورد فى سيولة مواد الدلتا مما أحدث انجرافا انتقلت بسببه المواد الشاطئية فى اتجاه البحر. وبسبب التخوف من تكرر هذه الحادثة ثانية فقد تم نقل مدينة فالديز سبعة كيلومترات فى موقع أكثر استقرارا الى الداخل. ومما زاد الخسارة موت 31 نسمة كانوا ينتظرون سفينة انقاذ قادمة حيث وقع الرصيف الذى كانوا فوقه فى البحر بمن عليه.

ويعزى معظم الدمار الذى أصاب مدينة انكوراج الى الانهيارات الأرضية والتى سببها اهتزاز سطح الأرض. فقد دمرت كثير من المنازل فى تورنا جين هايتس عندما فقدت طبقة من الطين قوتها وحملت معها مساحة تزيد عن 200 هكتار من الأراضى فى اتجاه المحيط (شكل 14 ـ 22). وقد كان الدمار شاملا حتى أنه تمت تسوية هذه المساحة بعد ذلك وحولت الى منتزه اطلق عليه اسم منتزه الزلازل. أما وسط مدينة انكوراج فقد تهدم وصار كتلا مفككة من التراب وقد هبط مستوى سطح بعض المناطق فى الحى التجارى بما يعادل 3 أمتار.

التنبؤ بالزلازل وتجنب أخطارها

لقد تسببت الاهتزازات التى أصابت سان فرناندو بكاليفورنيا صباح يوم 9 / 2 / 1971 فى وفاة 64 شخصا وفى خسارة مادية بلغت حوالى الألف مليون دولار (شكل 14 ـ 23). وسبب كل ذلك زلزال معتدل القوة بلغت درجته 6.6 على مقياس ريختر واستمر لمدة 60 ثانية. ولحسن الحظ وقع الزلزال فى الساعات الأولى من النهار، حيث يقل الازدحام فى الطرقات والمتاجر والمدارس مما قلل من الخسارة فى الأرواح. ولو تهدم السد الذى يحجب بحيرة فان نورمان والذى اصابه عطب بالغ، لفقد 80,000 آخرون حياتهم ولوقعت كارثة لم يسبق لها مثيل فى تاريخ المنطقة. وقد أكد هذا الزلزال الذى وقع فى المنطقةالمزدحمة لجنوب ولاية كاليفورنيا، من جديد الحاجةالى طرق يعتمد عليها فى التنبؤ بالزلازل وتفادى أخطارها.

وقد أدى موقع اليابان الكثير الزلازل الى الحاجةالملحة فى التنبؤ بها. فقد نشر اليابانيون شبكة معقدة من أجهزة تسجيل الاهتزازات تمتد 200 كيلومتر فى المحيط. فهناك فى



شكل 14 ـ 22

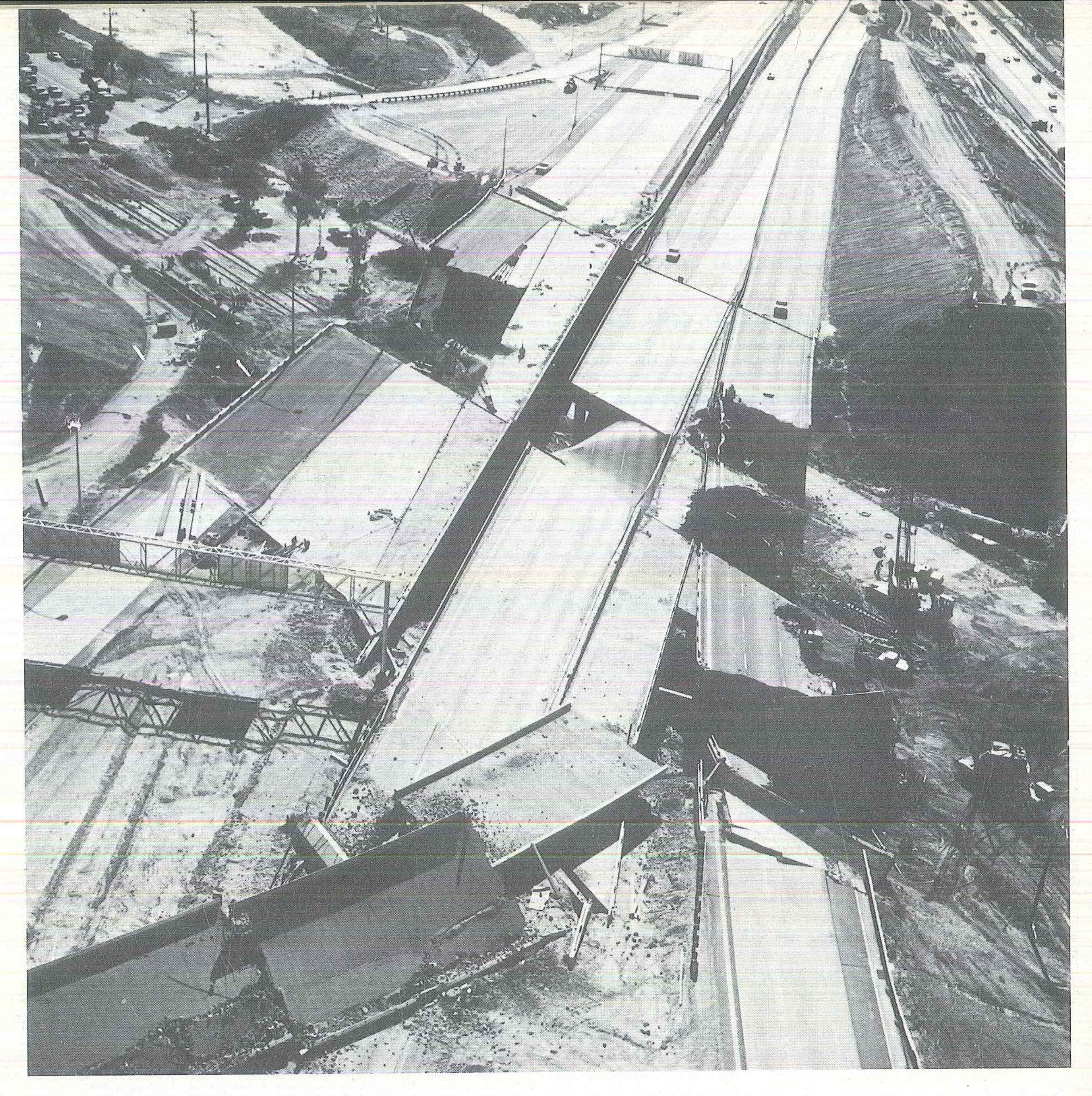
منظر للانزلاق الأرضى بمرتفعات تيرن أجين قرب أنكوراج، بعد الزلزال مباشرة.

قاع المحيط حيث يقل التشويش الاهتزازى، يخطط اليابانيون لتتبع مويجات الاهتزاز الزلزالى (الموجات الأمامية) التى تسبق الزلزال الرئيسى. ومن المؤمل أن يتحقق بتتبع هذه الأنشطة الزلزالية الوصول الى نظام يكفل التنبؤ بدقة بالهزات الأرضية القادمة.

ففى ولاية كاليفورنيا، قد وجد أنه يسبق الزلازل المعتدلة رفع أو هبوط فى الأرض وتغيرٌ فى الحركة لنطاقات الصدوع، من زحف بطىء الى توقف كامل فى الحركة.

ولذلك فانه من الممكن التنبؤ بالزلازل عن طريق الاستمرار فى تتبع ميلان سطح الأرض وحركة الصدوع والنشاط الاهتزازى. وقد بدأت بعض شبكات التتبع هذه عملها فى مناطق اخرى بالعالم.

ورغم عدم وجود طريقة مؤكدة حتى الآن للتنبؤ بالزلازل قبل حدوثها بقليل، إلاَّ أن هناك عدداً من التنبؤات الناجحة قد تحققت فعلا. ففى سنة 1966، قد تم التنبؤ بزلزال فى مدينة طشقند بالاتحاد السوفياتى بتتبع غاز الرادون



شكل 14 ـ 23

تحطم طريق معلق من جراء زلزال سان فرناندو 1971 .

فى الآبار. والرادون هو غاز خامل ينتج عن التحلل الذرى للراديوم، الذى يوجد بمقادير نادرة فى بعض الصخور. وعادة ما يبقى هذا الغاز محبوسا داخل الصخور ولكن بعد تراكم الضغط فيها تسمح التشققات الناشئة بهروبه. ففى الشهر الثانى من عام 1975 أمكن التنبؤ بزلزال فى شمال شرق الصين قبل ساعات فقط من وقوعه. وبإعلان حالة الطوارىء بين حوالى 3 مليون نسمة للبقاء خارج منازلهم فى مساء يوم بارد، أمكن انقاذ عشرات الآلاف من الأرواح. وقد أكد المراقبون التقارير التى وردت من الصين بأن حوالى 90 % من المبانى بمدينة هاى شنق قد لحقها ضرر بالغ. فالموجات الأمامية التى سبقت هذا الزلزال قد ساعدت على التنبؤ به وقد دفعت السكان الى الامتثال للتحذيرات.

ولسوء الحظ فقد تنبأ الصينيون بزلزال تانق شان القوى، ولكنهم لم يتمكنوا من تحديد تاريخ دقيق لوقوعه.

فاعلان حالة الطوارىء لزمن طويل بأن هناك زلزال قادم لم تكن من الدقة بحيث تنقذ ما قدر بحوالى 650,000 نسمة فقدوا حياتهم و 780,000 نسمة اصيبوا بجراح. كما حدثت فى الصين أيضا تحذيرات خاطئة. ففى منطقة هونج كونج، أخلى الناس مساكنهم لمدة زادت عن شهر ولم يحدث أى زلزال. فالحوار الذى يسبق أمر اخلاء مدينة كبيرة مثل لوس أنجلوس لا بد أن يكون طويلا. اذ لا بد من الأخذ فى عين الاعتبار تكاليف الاخلاء ووقت العمل الضائع ومشاكل أخرى عديدة لها علاقة بالاخلاء ثم موازنتها بالاحتمال المتوقع للزلزال. فلا بد أن يصبح التنبؤ بالزلازل علما معتمدا قبل أن تصدر هذه التحذيرات.

أما عملية التحكم فى وقوع الزلازل فهو أمر آخر مختلف تماما. ومما اعطى العلماء بعض التشجيع ما تم اكتشافه من أن الانسان قد تسبب فعلا فى حدوث بعض الزلازل. وقد أتى الدليل المقنع عن احداث الزلازل بفعل الانسان فى الفترة ما بين 1962 و 1966 عندما درس النشاط الزلزالى للمحطة الكيميائية لصناعة الأسلحة بجبال الروكى قرب مدينة دنفر. فلم تسجل مصلحة مسح الأراضى والسواحل أى نشاط زلزالى فى مدينة دنفر لمدة 80 عاما قبل سنة 1962. وفى تلك السنة بدأت المحطة الكيميائية فى ضخ النفايات الناتجة عن انتاج المواد الكيميائية الحربية فى بئر يبلغ عمقها 3600 متر. ففى الفترة المصاحبة لضخ النفايات من شهر 4 / 1962 إلى شهر 9 / 1965، أمكن تسجيل 700 هزة أرضية خفيفة من بينها 75 كانت من القوة بحيث شعر الناس بها. فقد تسبب ضخ المياه تحت ضغط فى تسليك الصدع الذى كان يتراكم فيه تأثير الضغط خلال فترة زمنية. وليس التأثير المُسَلِّك هو الذى يجعل الصخور عبر الصدع زلقة، ولكن الماء يضغط بقوة الى الخارج فى اتجاه عمودى على سطح الصدع. وتعمل هذه القوة فى اتجاه معاكس للقوة الطبيعية التى تعمل الى الداخل، والتى تنتج عن وزن الصخور فوق سطح الصدع. وعندما أوقف الضخ لمدة سنة، لوحظ تناقص فى النشاط الزلزالى، وبعد استئناف الضخ مرة أخرى زاد تكرار الهزات الأرضية زيادة ملحوظة.

وقد وقعت زلازل أخرى بسبب نشاط الانسان فى مناطق مجاورة لبحيرات السدود. فمثلا منذ امتلاء بحيرة ميد على حدود ولايتى أريزونا ونيفادا فى سنة 1936 تم تسجيل مئات من الهزات الخفيفة. ويعتقد بأن سبب الزلازل هو الماء المضاف لمياه البحيرة وربما ساعد فى ذلك تأثير التسليك أيضا للمياه المتسربة الى الصخور تحت البحيرة. كما يعتقد بأن خزانا آخر كان سببا فى احداث زلزال مدمر فى الهند مات بسببه 200 شخص. كما أن التفجيرات النووية تحت الأرض تحدث عددا من الهزات التلوية التى لم يصل أى واحد منها الى حجم الانفجار الذى سببها.

ويأمل كثير من العلماء أن يتوصلوا فى يوم ما الى التقليل من أخطار الزلازل عن طريق احداث عدد من الهزات الصغيرة باستعمال ضخ السوائل أو التفجيرات النووية. فمثل هذه الطرق سوف تطلق الضغط المحبوس ببطء مستمر والذى قد يتراكم فى حالة عدم اطلاقه لينطلق على هيئة زلزال قوى. وتذكر دائما أنه يتطلب الأمر اطلاق عدة آلاف من الهزات الصغيرة لتعادل الطاقة المنطلقة من زلزال واحد قوى.

وبالاضافة الى وقوع كثير من مناطق الصدوع فى غير متناول الانسان، فان هذه الحقيقة تجعل من احتمال التحكم فى الزلازل أمراً غير ممكن كما قد يبدو لأول وهلة. ومن الحالات المناسبة للتحكم فى الزلازل وجود بؤر الزلازل فى أعماق ضحلة بولاية كاليفورنيا مما يسهل من عمليات الحفر. ولا بد أن تجرى عدة اختبارات فى مناطق نائية قبل أن نجرؤ على المخاطرة باستعمال هذه الطريقة على امتداد شبكة الصدوع مثل فالق سان اندرياس أو على الأقل فى المناطق المكتظة بالسكان.

أسئلة للمراجعة :

1 - ما هو الزلزال؟ وتحت أى الظروف تقع الزلازل؟

2 - ما هى العلاقة بين الصدوع والبؤر والمراكز السطحية للزلازل؟

3 - تقع الزلازل فقط فى الغلاف الصخرى المتصلب ولا تقع فى الغلاف الوهن اللدن. اشرح هذه الظاهرة باستعمال فكرة الارتداد المرن.

4 - قد تعتبر الصدوع التى لا يعتريها زحف نشط مأمونة، فنّد أو عزز هذه الجملة.

5 - صف المبدأ الذى اسست عليه المرجفة.

6 - ميز بين حركة الموجات الأولية (و) وحركة الموجات الثانوية (ث)؟

7 - تنتقل الموجات الأولية (و) خلال الأجسام الصلبة والسائلة والغازية، بينما تنتقل الموجات الثانوية (ث) خلال الأجسام الصلبة فقط. إشرح ذلك.

8 - باستعمال شكل 14—13 ، حدد المسافة بين زلزال ومحطة رصده، اذا وصلت أول موجة ثانوية (ث) بعد 3 دقائق من وصول أول موجة أولية (و).

9 - رغم أن مقياس ميركاللى لشدة الزلازل هو أكثر دقة من المحاولات السابقة لوصف الشدة إلا أن له عيوباً، صف باختصار هذه العيوب.

10 - ما هو الفرق بين مقدار وشدة الزلزال؟

11 - لكل زيادة مقدارها واحد صحيح على مقياس ريختر يزداد المقدار بمعدل . . . . مرات.

12 - تزيد الطاقة المنطلقة من زلزال مقداره 7 على مقياس ريختر بـ . . . . ضعفا عن زلزال مقداره 6 .

13 - عدد ثلاثة عوامل تؤثر فى مقدار الدمار الذى تسببه الموجات الاهتزازية؟.

14 - بالاضافة الى الدمار الذى يحدث مباشرة بواسطة الموجات الاهتزازية، عدد ثلاثة أنواع أخرى من أسباب الدمار المصاحب للزلازل.

15 - كيف يمكن التحكم فى الزلازل مستقبلا؟

الكلمات الدالة :

ارتداد مرن	elastic rebound
بؤ رة	focus
بؤ رة ضحلة	shallow focus
بؤ رة عميقة	deep focus
بؤ رة متوسطة	intermediate focus
تسونامى	tsunami
رجات أمامية	foreshock
رجات تلوية	after shock
زلزال	earthquake
سجل مرجفة	seismogram
سيتشى	seiche
صدع	fault
مركز سطحى	epicenter
مرجفة	seismograph
مقدار	magnitude
مقياس ريختر	richer scale
مقياس الشدة لميركاللى	mercalli intensity scale
موجة أولية	primary wave
موجة ثانوية	secondary wave
موجة سطحية	surface wave
موجة طويلة	long wave
موجة عميقة	body wave
موجة متوسطة	medium wave
قصور ذاتى	inertia
نطاق بينيوف	benioff zone

15



باطن الأرض


15

سبر أعماق الأرض

- طبيعة الموجات الاهتزازية
- اكتشاف التركيب الداخلى للأرض

القشرة الأرضية

الوشاح

اللب

بالرغم من أن مكونات جوف الأرض ليست بعيدة عن موطىء أقدامنا فإن خضوعها للملاحظة المباشرة يعتبر محدودا جدا. فمثلا عندما نقارن مجهوداتنا المبذولة لسبر أعماق الأرض عن طريق الحفر، بما أنجزناه فى مجال الفضاء فان هذه الحقيقة تبدو جلية. وحسب برامج اكتشاف النظام الشمسى، فان تكاليف المركبات الفضائية الأخيرة المستَكْشِفَة لكوكب زحل تساوى تكاليف حفر بئر واحدة عمقها حوالى 1600 كيلومتر فى صلب الأرض. وهذا العمق يفوق بكثير التسع كيلومترات التى أمكن حفرها حتى الآن. ورغم انه يمكن اعتبار النشاط البركانى نافذة نطل بها على جوف الأرض، لأن المواد تصعد من أسفل، فان هذا النشاط لا يسمح إلا باطلاعٍ محدود للمائتى كيلومتر الخارجية لكوكبنا. وهذا لا يشكل إلاّ جزءاً صغيرا من نصف قطر الأرض البالغ 6370 كيلومترا.

ولحسن الحظ تعلم الجيولوجيون الكثير عن تركيب الأرض عن طريق أبحاث الفضاء وبواسطة التجارب المعملية للصخور تحت ضغط عال ومن العينات القادمة من الكواكب المكونة للنظام الشمسى والنيازك التى كثيرا ما ترتطم بسطح الأرض. والأهم من ذلك فانه أمكن الحصول على دلائل عن الخواص الطبيعية داخل كوكبنا عن طريق دراسة الموجات الاهتزازية التى تولدها الزلازل والتفجيرات النووية. وعندما تمر الموجات الاهتزازية بالأرض فانها تنقل معلومات عن المواد التى تنتقل خلالها الى سطح الأرض، ولهذا فانه بالتحليل الدقيق، تعطى الموجات الاهتزازية ما يشبه صورة الأشعة السينية لنطاقات الأرض.

تستعمل الموجات الاهتزازية لاستكشاف النطاقات العميقة تحت سطح الأرض

سبر أعماق الأرض

إن الكثير مما نعرفه عن أعماق الأرض يأتى من دراسة الموجات الأولية (و) أى الموجات التضاغطية والموجات الثانوية (ث) أى الموجات القاصة، التى تخترق نطاقات الأرض وتظهر عند نقطة بعيدة عن مصدرها. وبتعبير بسيط، فان هذه الطريقة تعتمد على القياس الدقيق للزمن اللازم لانتقال الموجات الاهتزازية من موقع زلزال أو انفجار نووى الى محطة رصد زلزالى. وحيث أن الزمن اللازم لانتقال موجات (و) وموجات (ث) عبر الأرض يعتمد على خواص المواد الصخرية التى تعترض طريقها، فان علماء الزلازل يبحثون عن مقدار التفاوت فى زمن الانتقال الذى لا يمكن أن يعزى الى الفروق فى المسافات المقطوعة. اذ تتناسب هذه الفروق مع الاختلاف فى خواص الصخور.

وقد تساعد المقارنة البسيطة على توضيح هذه الطريقة المتبعة لسبر أعماق الأرض. ولهذا الغرض، نفرض أنك تسافر على نفس الطريق كل صباح الى نقطة معينة. وتستغرق هذه الرحلة نفس الفترة الزمنية كل يوم من أيام الأسبوع ما عدا يوم الجمعة التى تستغرق يومها مدة أطول بعدة دقائق. وقد كلف شخص آخر بتحديد الزمن الذى تستغرقه رحْلتك اليومية (دون أن يتبعك) ومعرفة سبب الزمن الزائد فى رحلة يوم الجمعة. وهل تتوقف فى مواقع معينة أو هل هناك شىء ما يؤخرك يوم الجمعة دون الأيام الأخرى. فلا بد أن يفسر علماء الزلازل التفاوت المشابه فى زمن الانتقال. وحيث أن الأرض ليست جسما متجانس التركيب، فانه يحدث تفاوت فى أزمنة الانتقال لأن الموجات المنتقلة عبر نطاقات الأرض تعترض طريقها فروق فى طبيعة المواد باختلاف أعماقها.

واحدى المشاكل الهامة هى أنه للحصول على أزمنة انتقال دقيقة لا بد من تعيين الموقع الصحيح والزمن للحدث

الاهتزازى. وبالنسبة للزلازل فانه لا يمكن الحصول على هذه المعلومات إلاّ من الموجات الاهتزازية نفسها. وذلك يجعل قياسها غير مؤكد. وعلى عكس ذلك، تمتاز التفجيرات النووية على الزلازل بكون الزمن الصحيح والمسافة معلومين. ولكن رغم محدودية الاستفادة من دراسة الموجات الاهتزازية الناشئة عن الزلازل، فان علماء الزلازل قد تمكنوا خلال النصف الأول من هذا القرن، من تحديد النطاقات الأساسية للأرض. ولكن لم يتم التأكد من رسم التركيبات الدقيقة للأرض إلا بعد مطلع ستينات القرن العشرين، وذلك عندما بلغت التجارب النووية أوجها وبعدما تم نصب شبكات تحتوى على مئات من المراجف الحساسة.

طبيعة الموجات الاهتزازية

لفحص ماهية الأرض وتركيباتها، فانه لا بد من دراسة بعض الخواص الأساسية لنقل وتولد الموجات. وكما ذكر فى الفصل السابق، فان الموجات الاهتزازية تنتقل من مصدرها فى جميع الاتجاهات على هيئة جبهة الموجة. ومن المتبع لأغراض الايضاح أن ترسم المسارات التى تأخذها الموجات على هيئة أشعة أو خطوط مرسومة فى اتجاهات عمودية على مقدمة الموجات كما هو موضح فى شكل 15 ـ 1. ومن الخصائص الهامة للموجات الاهتزازية ما يلى:

شكل 15 ـ 1

تنتقل الموجات الاهتزازية فى جميع الاتجاهات من المصدر الزلزالى (البؤرة) فى صورة جبهات للموجات ويمكن تمثيل اتجاه الحركة بخطوط شعاعية وهى خطوط ترسم متعامدة مع جبهات الموجات.

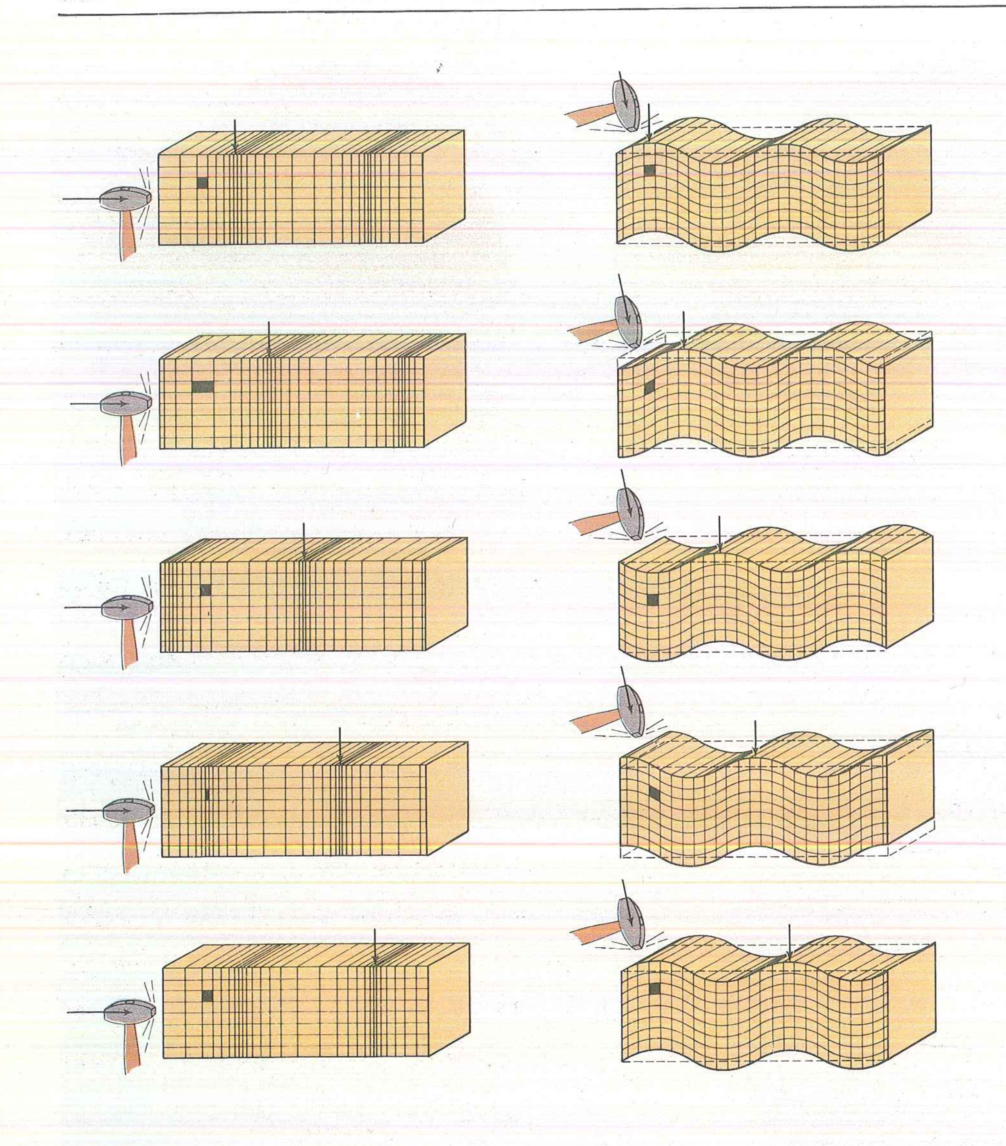
1 ـ تتوقف سرعة الموجات الاهتزازية على كثافة ومرونة المواد التى تخترقها. حيث تنتقل الموجات الاهتزازية أسرع خلال المواد الصماء والتى تعود بمرونة كافية الى وضعها الأصلى، بعد إزالة الأثر عليها. فمثلا تعمل كتلة من الصخور البلورية على نقل الموجات الاهتزازية بسرعة أكبر من طبقة من المواد غير المتماسكة.

2 ـ وخلال الطبقة الواحدة، تزداد سرعة الموجات الاهتزازية عادة بازدياد العمق لأن ازدياد الضغط يعمل على كبس الصخور الى مادة أكثر تماسكا ومرونة.

3 ـ الموجات الأولية (و) أى الانضغاطية والتى تتأرجح الى الأمام والى الوراء فى نفس الاتجاه الذى تنتقل فيه، تستطيع اختراق الأجسام الصلبة وكذلك السوائل، لأن هذه المواد تتصرف بمرونة عندما يعتريها التضاغط وهذا يعنى أنها ترجع الى شكلها الأصلى بمجرد رفع الضغط عنها (شكل 15 ـ 2 أ). أما الموجات الثانوية (ث) أى القاصة والتى تتأرجح فى اتجاه عمودى على اتجاه حركتها، فانها لا تستطيع الانتقال عبر السوائل لأن السوائل لا تتحمل الموجات القاصة وهى فى ذلك تختلف عن الأجسام الصلبة (شكل 15 ـ 2 ب). وهذا يعنى أن السوائل تتدفق ببساطة عندما تتعرض لقوة تعمل على تغيير شكلها.

4 ـ تنتقل موجات (و) اسرع من انتقال موجات (ث) فى جميع المواد.

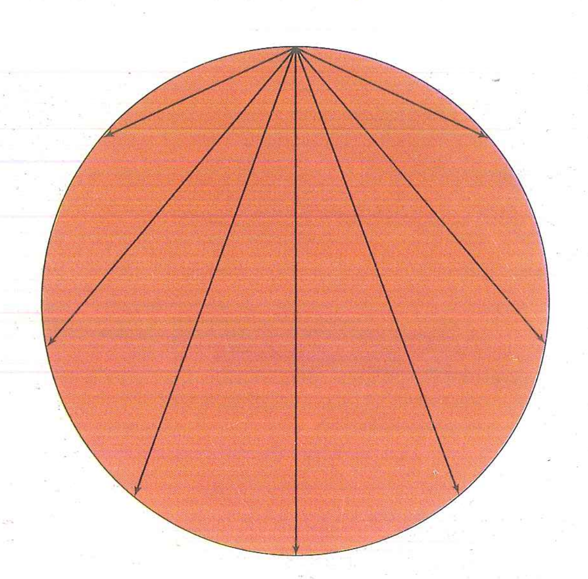
5 ـ عند مرور الموجات الاهتزازية من مادة الى أخرى فان طاقة الموجات تنكسر (تنحنى). هذا بالاضافة الى أن بعض الطاقة ينعكس عند **الحد الفاصل** بين المادتين المختلفتين . وهذا يشبه ما يحدث للضوء عند مروره من الهواء الى الماء. ولهذا فان ذلك يتوقف على طبيعة الطبقات التى تعترض طريق الموجات الاهتزازية. فهى إما أن تزداد سرعتها أو تتباطأ أو تنحنى أو



شكل 15 ـ 2
انتقال الموجات الأولية (و) والموجات الثانوية (ث) عبر مادة صلبة.
(أ) ـ يسبب مرور الموجات الأولية تناوب عمليتي التضاغط والارتخاء عبر المواد التي تخترقها الموجات.
(ب) ـ أما مرور الموجات الثانوية فيسبب تغيرا في الشكل دون تأثير في الحجم للمواد المخترقة. ونظرا لأن السوائل تتصرف بمرونة عند تعرضها للتضاغط يعني انها ترجع الى سابق وضعها عند رفع الضغط عنها فهي تنقل الموجات الأولية (و) وحيث ان السوائل لا تقاوم التغير في الشكل فلا يمكن للموجات الثانوية ان تنتقل خلالها.

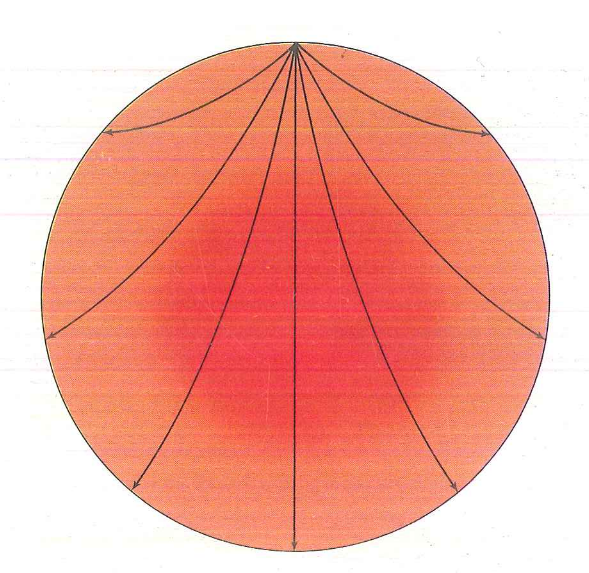
تتوقف نهائيا في بعض الأحيان. وتساعد هذه التغيرات، الخاضعة للملاحظة الخاصة بحركة الموجات الزلزالية، علماء الزلازل على سبر أعماق الأرض.

ولو كانت الأرض كتلة متجانسة تماما لانتشرت الموجات الزلزالية في جميع الاتجاهات كما في شكل 15 ـ 3. وتنتقل الموجات الزلزالية المارة عبر مثل هذا الكوكب النموذجي في خطوط مستقيمة بسرعة ثابتة. ولكن الحال ليس كذلك بالنسبة للأرض. فالواقع فعلا أن الموجات الزلزالية الواصلة الى مراصد بعيدة من موقع زلزال ما تنتقل أسرع من الموجات المسجلة قرب هذه المراصد. وكما ذكر آنفا، فان الزيادة العامة في السرعة المصاحبة لازدياد العمق هي ناتجة عن زيادة الضغط الذي يعمل على تقوية الخصائص المرنة للصخور الواقعة تحت أعماق كبيرة. ونتيجة لذلك فان مسارات الموجات عبر الأرض تنكسر (تنحني) كما هو موضح في شكل 15 ـ 4. وعندما تم تطوير مراجف أكثر حساسية، اتضح من خلالها أنه الى جانب التغيرات التدريجية في السرعة هناك تغيرات فجائية عند أعماق معينة. وحيث أن عدم الاستمرارية قد سجلت في جميع مناطق العالم، فقد



شكل 15 ـ 3

تنتقل الموجات الاهتزازية عبر كوكب متجانس الخواص فى مسارات مستقيمة وبسرعة منتظمة.

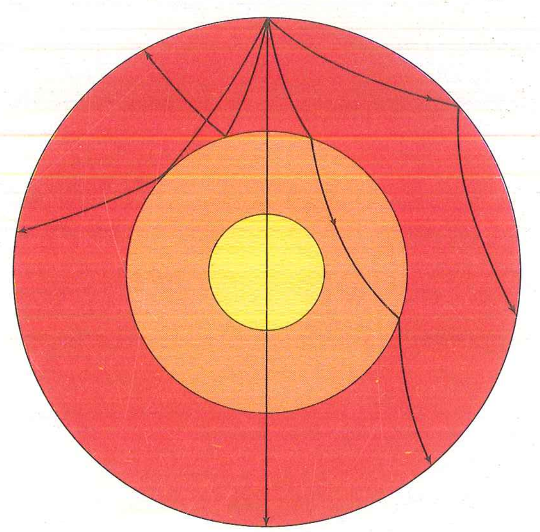


شكل 15 ـ 4

مسارات الموجات الاهتزازية عبر كوكب تزداد فيه السرعة بازدياد العمق

استنتج علماء الزلازل من ذلك أن الأرض مكونة من نطاقات مميزة أو أغلفة ذات محتوى وتركيب مختلفين (شكل 15 ـ 5). ويعتقد بأن اختلاف تركيب النطاقات قد حدث خلال فترة مبكرة فى تاريخ الأرض عندما كانت منصهرة تماما. فخلال هذه الفترة غاصت المواد الثقيلة بينما طفت المواد الخفيفة الى أعلى. ومن ناحية أخرى فان التركيب النطاقى يمثل مواد هى من نفس التركيب ولكنها مرت بتغير فى أطوارها. ويحدث التغيرّ فى الطور عندما تنصهر الصخور أو تقترب من درجة الانصهار، أو عندما يتشكل تركيب الذرات المكونة للمعادن فى هيئة هيكل بلورى أكثر تراصاً استجابة الى الضغط الهائل فى أعماق الأرض.

هذا وقد استمر تصنيف وتحليل المعلومات الزلزالية المجمعة من عدة مراصد لعدة سنوات. ومن هذه المعلومات طوّر علماء الزلازل خلال الخمسة وسبعين سنة الماضية، تصورا تفصيليا عن أعماق الأرض، (شكل 15 ـ 6). ويستمر الخبراء فى مراجعة وتدقيق هذا النموذج كلما تواجدت معلومات أكثر وكلما استعملت طرق اهتزازية حديثة. وعلاوة على ذلك، يضاف الى هذه المعلومات نتائج الدراسات

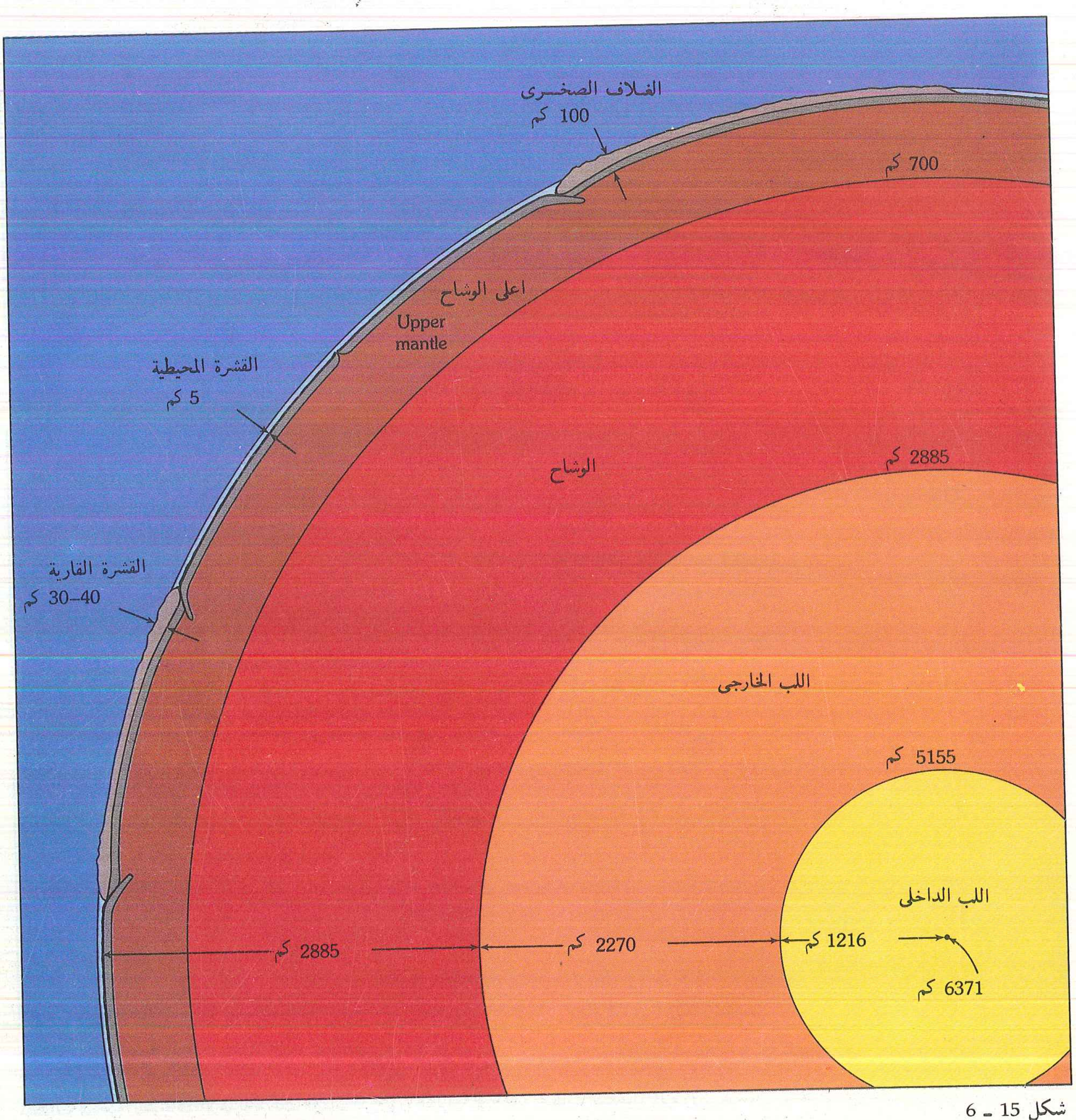


شكل 15 ـ 5

بعض المسارات المحتملة للأشعة الاهتزازية عبر الأرض.

المعملية التى تحدد بالتجربة خصائص المواد المختلفة للأرض الواقعة تحت ظروف بيئية متطرفة فى أعماق الأرض.

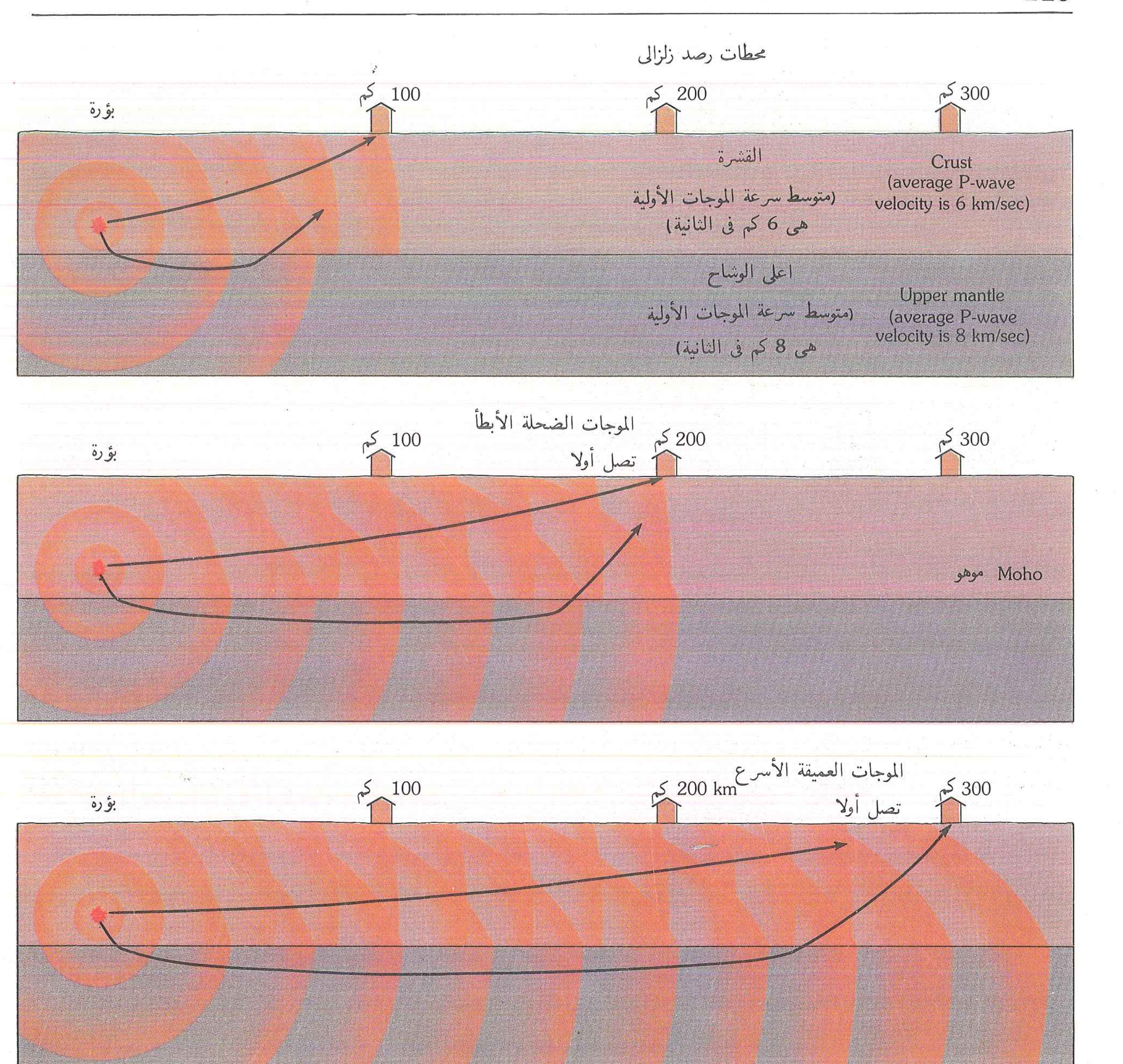
وبناء على هذه المعلومات الاهتزازية تقسم الأرض الى أربعة نطاقات أساسية: (1) **القشرة**، وهى نطاق خارجىٌ رقيقٌ جداً و (2) **الوشاح**، وهو نطاق صخرى يقع تحت



شكل 15 ـ 6

قطاع عرضى للأرض يوضح تركيبها الداخلى

القشرة ويبلغ سمكه حدا أقصى مقداره 2885 كيلومتر و (3) **اللب الخارجى**، وهو نطاق يبلغ سمكه 2270 كيلومترا وله خصائص السائل المتحرك و (4) **اللب الداخلى**، وهو كرة معدنية صلبة يبلغ نصف قطرها 1216 كيلومترا. وكما سنرى فان هناك ملامح أخرى هامة قد اكتشفت داخل هذه النطاقات.

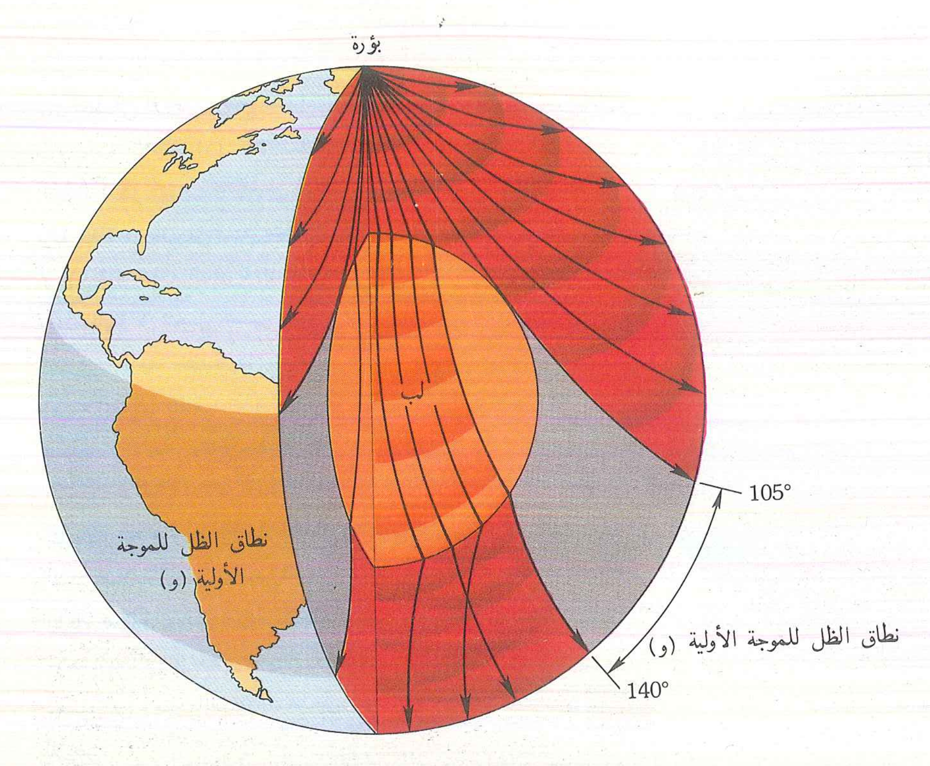


شكل 15 ـ 7

مسارات نموذجية للموجات الاهتزازية عند انتقالها من بؤرة الزلزال الى ثلاثة محطات لتسجيل الزلازل. تستقبل المحطتين القريبتين الموجات البطيئة أولا لأن مسافة الانتقال قريبة. أما اذا كانت المسافة ابعد من 200 كيلومتر فان الموجات السريعة هى التى تصل أولا حيث انها تنتقل بسرعة عبر الوشاح.

اكتشاف التركيب الداخلى للأرض

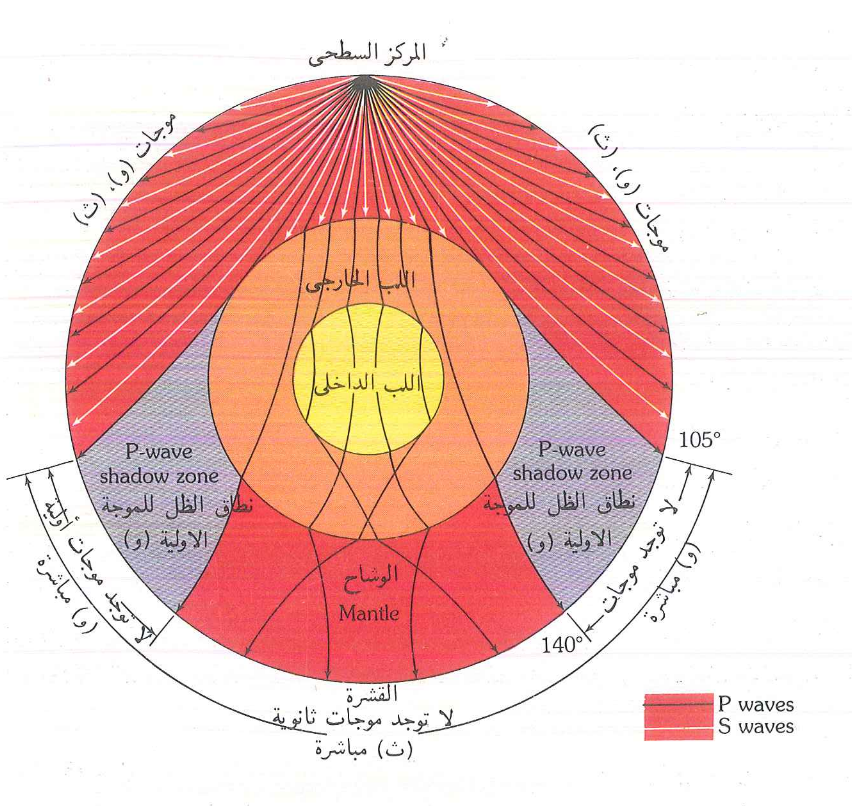
فى سنة 1909، قدم رائد علم الزلازل اليوغوسلافى اندريا موهوروفيشك؛ أول دليل مقنع لوجود نطاقات داخل الأرض. ويفصل النطاق الذى اكتشفه بين صخور القشرة الأرضية وصخور أخرى ذات تركيب مختلف فى الوشاح الذى يقع أسفلها. وقد سُمِّى هذا الحد **بالفاصل الموهوروفيشى** تخليدا له. ولأسباب معروفة اختصر هذا الاسم الى موهو.



شكل 15 ـ 8
يعمل التغير المفاجىء للخواص الطبيعية عند الحد الفاصل بين الوشاح واللب على الانحناء الشديد لمسارات الموجات الزلزالية، ونتيجة لهذا الانحناء المفاجىء لاتجاه الموجات تنشأ منطقة ظل للموجات الأولية بزاوية تتراوح بين 105 و 140 درجة.

وبالفحص الدقيق للسجلات الاهتزازية للزلازل الضحلة وجد موهوروفيشك أن مراصد الزلازل الواقعة على مسافات أبعد من 200 كيلومتر من زلزال ما قد سجلت متوسط سرعة انتقال للموجات الأولية أكبر من محطات التسجيل الواقعة قرب الزلزال. وبصفة خاصة فان الموجات الأولية (و) الواصلة الى محطة التسجيل الأقرب أولا، كان متوسط سرعتها حوالى 6 كيلومترات فى الثانية. وبالمقارنة فان الطاقة الاهتزازية المسجلة عند المحطات البعيدة تنتقل بسرعة تقارب 8 كيلومترات فى الثانية. فهذا التغيّر المفاجىء فى السرعة لا يتناسب مع الوضع السائد الذى تم تسجيله من قبل. وقد استنتج موهوروفيشك من هذه المعلومات أن هناك نطاقا يقع الى عمق 30 كيلومترا له خصائص طبيعية تختلف عن القشرة الخارجية للأرض. ويوضح شكل 15 ـ 7 كيف وصل موهوروفيشك الى هذا الاستنتاج الهام. لاحظ أن أول مسار يصل الى محطة الرصد الواقعة على بعد 100 كيلومتر من المركز السطحى قد انتقل فى أقصر طريق مباشرة عبر القشرة الأرضية. ولكن عند محطة الرصد الواقعة على بعد 300 كيلومتر من المركز السطحى، فان أول موجة من نوع (و) وصلت بعد أن دخلت وانتقلت خلال الوشاح (نطاق السرعة الأعلى). ولذلك رغم انتقال هذه الموجة مسافة أكبر فانها قد وصلت محطة التسجيل فى فترة زمنية أقصر من أى مسار آخر مباشر لأنها قطعت شوطا أكبر من رحلتها عبر منطقة ذات تركيب مختلف. وهذا المبدأ هو مشابه تماما لسائق سيارة فى الطريق الدائرى حول مدينة كبيرة خلال ساعات الازدحام. فرغم أن هذا الطريق أطول إلا أنه قد يكون أسرع.

وقد اكتشف عالم الزلازل الألمانى بينو جوتنبرج بعد سنوات قليلة فاصلا آخر أساسيا. وقد كان السبب فى اكتشاف هذا الفاصل هو ملاحظة ضعف موجات (و) ثم اختفائها تماما عند زاوية 105° من موقع زلزالى ثم ظهورها مرة أخرى عند حوالى 140° من موقع الزلزال نفسه، بعد مرور دقيقتين تقريبا من موعدها الذى يجب أن تظهر عنده حسب المسافة المقطوعة. ويبلغ عرض هذا الحزام الذى تختفى فيه الموجات الزلزالية المباشرة حوالى 35 كم اطلق



شكل 15 ـ 9
رسم تخطيطى للأرض يوضح مسارات الموجات الأولية (و) والموجات الثانوية (ث). أى منطقة تقع فى اتجاه يزيد 105 درجات من المركز سوف لا تستقبل الموجات الثانوية المباشرة حيث انها لا تنتقل عبر اللب الخارجى. توجد منطقة ظل محدودة (من 105 الى 140 درجة) بالنسبة للموجات الأولية. وتنتج منطقة ظل الموجات الأولية هذه عن انحناء هذه الموجات عند مرورها من مواد الوشاح الأكثر صلابة الى مواد اللب الخارجي الأقل صلابة. وتزداد سرعة الموجات الاهتزازية التى تمر خلال مركز الأرض معبرة عن وجود اللب الداخلى للأرض.

عليه اسم **نطاق الظل** (شكل 15 ـ 8). ولقد استنتج جوتنبرج أن بامكانه تفسير نطاق الظل هذا إذا افترض أن الأرض بها لب مكون من مواد مختلفة فى طبيعتها عن المواد التى فى الوشاح وأن قطر هذا اللب يبلغ 3420 كيلومترا. فلا بد أن اللب قادر بشكل ما على منع انتقال الموجات نوع (و) وبطريقة مشابهة لحجب أشعة الضوء بواسطة جسم معتم والذى يكوّن ظلاً خلفه. ولكن، بدلا من منع انتقال الموجات، فان منطقة الظل هذه تنشأ من انحناء الموجات نوع (و) عندما تدخل اللب كما يظهر فى شكل 15 ـ 8 .

وقد علم أيضا أن الموجات الثانوية (ث) لا تستطيع الانتقال عبر اللب ولذلك فقد استنتج الجيولوجيون بأن جزءاً من هذه المنطقة لا بد أن يكون سائلا لا صلبا (شكل 15 ـ 9). ومما يدعم هذا الاستنتاج، أن سرعة الموجات الأولية (و) تتناقص بمقدار 40 % عند دخولها الى اللب. وحيث أن الانصهار يقلل من مرونة الصخور، فان جميع الأدلة تشير الى وجود نطاق سائل تحت الوشاح الصخرى.

وفى سنة 1936، تم التنبؤ بالنطاق الأخير من نطاقات أعماق الأرض وذلك باكتشاف موجات اهتزازية يعتقد بأنها منعكسة من فاصل داخل اللب. وبذلك اكتشف اللب الداخلى للأرض. وقد كان من غير الممكن حساب الحجم الحقيقى للب الداخلى للأرض حتى مطلع الستينات وذلك بعد اجراء التجارب النووية تحت الأرض.

ونظرا لمعرفة زمن ومكان التفجيرات النووية بدقة فان صدى الموجات الزلزالية المنعكس من اللب الداخلى قد أمدنا بطريقة صحيحة لتحديد حجمه (شكل 15 ـ 10). وعن طريق هذه المعلومات والدراسات اللاحقة لها، فقد تم تحديد نصف قطر اللب الداخلى بحوالى 1216 كيلومترا. هذا بالاضافة الى أن الموجات الزلزالية نوع (و) المارة باللب الداخلى لها زمن انتقال أسرع من الموجات المارة باللب الخارجى. كما تعد الزيادة فى مرونة اللب الداخلى دليلا على الطبيعة الصلبة لهذه المنطقة الداخلية. وقد سمح التقدم الكبير فى علم الزلازل وميكانيكية الصخور خلال الخمس

شكل 15 ـ 10

استعملت أزمنة العبور للموجات الاهتزازية الناشئة عن تفجيرات التجارب النووية فى قياس عمق اللب الداخلى بدقة وقد استعمل صف من المراجف بولاية مونتانا فى تسجيل الصدى المرتد عن حافة اللب الداخلى.

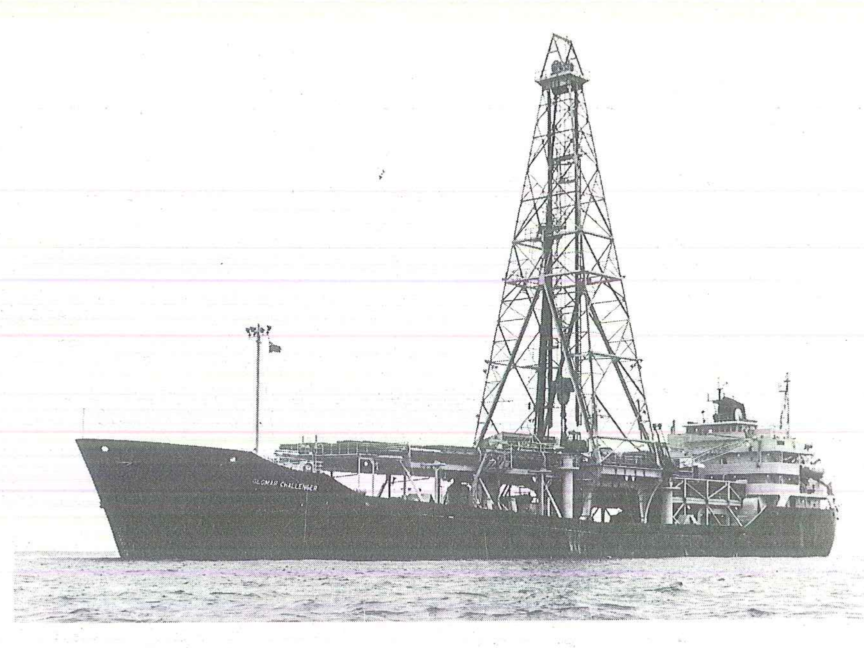
والعشرين سنة الماضية بتحسن كبير فى الصورة العامة لجوف الأرض والتى تم شرحها آنفا.

القشرة الأرضية

يصل سمك القشرة الأرضية فى المتوسط الى أقل من 20 كيلومترا، مما يجعلها أقل سمكا من أى نطاق اكتشف حتى الآن. ولكن على امتداد هذا النطاق الرقيق هناك تفاوت فى تركيب الصخور وفى سمكها. فبينما يبلغ سمك صخور القشرة الأرضية فى الكتل القارية حوالى 35 كيلومترا، فان سمك القشرة المحيطية هو أقل بكثير إذ يبلغ فى المتوسط 5 كيلومترات. وتصل القشرة الأرضية أكبر سمك لها فى عدد من المناطق الجبلية المعروفة، إذ يزيد سمكها عن 60 كيلومترا وبالمقارنة فان سمكها فى الداخل المستقر للقارات يقرب من 30 كيلومترا.

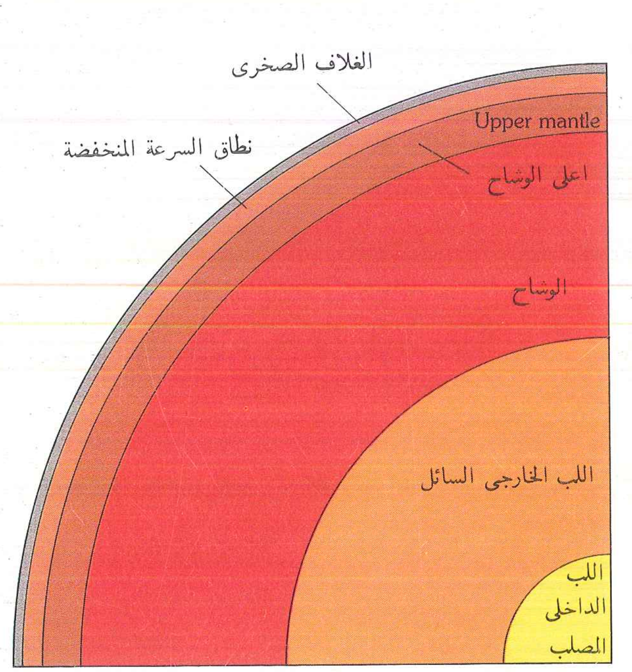
ومن خلال دراسات سرعة الموجات الاهتزازية الأولية فقد تم لأول مرة معرفة بأن صخور قشرة الأحواض العميقة للمحيطات تختلف فى تركيبها عن تلك التى فى الألواح القارية. ويشير زمن انتقال موجات (و) الى أن سرعة 6 كيلومترات فى الثانية تعتبر سرعة نموذجية بالنسبة لصخور القارات، بينما سجلت سرعة 7 كيلومترات فى الثانية بالنسبة لصخور القشرة المحيطية. وقد أعدت تجارب معملية لتحديد أنواع مواد الأرض التى تحدث أزمنة انتقال مشابهة تقريبا لتلك المسجلة لهذه النطاقات الصخرية. ومن هذه التجارب وكذلك من المشاهدة المباشرة، أمكن مقارنة متوسط تركيب الصخور القارية بالصخور النارية المعروفة (الجرانيت). وكما فى الجرانيت، فمن المعتقد بأن القشرة القارية غنية بعناصر البوتاسيوم والصوديوم والسليكون وأن كثافتها تبلغ 2.8 ضعف كثافة الماء. ورغم أن هناك عدة صخور مقتحمة من الجرانيت وما يكافئها من المتحولة، مثل صخر النايس، إلاَّ أن تدفقات كبيرة من البازلت والسلاسل البركانية المكونة من الصخور الأنديسيتية هى أيضا وفيرة. ونتيجة لذلك هناك دلائل على أن متوسط تركيب القشرة القارية هو أكثر شبها بالتركيب المتوسط مثل تركيب الانديسيت والديوريت منه بتركيب الجرانيت الصافى.

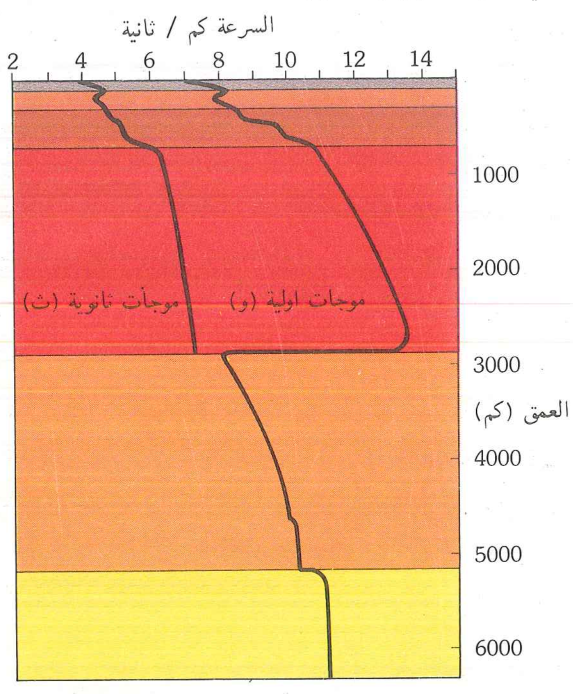
وحتى عهد قريب لم يكن بوسع الجيولوجيين سوى التخمين بالنسبة لتركيب القشرة المحيطية العميقة التى تقع تحت عمق 4 كيلومترات من مياه البحار وعدة مئات من الأمتار من الرواسب. وبتطوير سفينة الحفر فى المياه العميقة المسماة جلومر تشالنجر، أمكن الحصول على قوالب صخرية من قاع المحيطات (شكل 15 ـ 11). ومصداقا للتنبؤات فقد كانت العينات المتحصل عليها فى غالبها من البازلت، وهى تختلف تماما عن الصخور المكونة للقارات. تذكر أنه من المعروف أن الانفجارات البركانية لمواد البازلت هى المسئولة



شكل 15 ـ 11

سفينة الأبحاث جلومار تشالنجر.





شكل 15 ـ 12

التغيرات فى سرعة الموجات الأولية (و) والثانوية (ث) مع العمق. تحدد التغيرات الفجائية فى متوسط سرعة الموجات الملامح الاساسية لأعماق الأرض. فعند عمق 100 كيلومتر يتناسب النقص الشديد فى سرعة الموجات مع اعلى منطقة للسرعة المنخفضة. كما يوجد انحناءان فى مسار السرعة فى الجزء العلوى من الوشاح عند عمقى 400 كيلومتر و 700 كيلومتر. ويعتقد بأن سبب هذا التفاوت هو أن المعادن تمر بتغيرات فى الطور وليس مرد ذلك الفروق فى التركيب المعدنى. اما الانخفاض المفاجىء فى سرعة الموجات الأولية وانعدام الموجات الثانوية عند عمق 2885 كيلومترا فهو يمثل الحد الفاصل بين اللب والوشاح. إذ لا يسمح اللب الخارجى السائل بانتقال الموجات الثانوية. كما ان الموجات الأولية تنتقل ببطء فى هذا النطاق. وتزداد سرعة الموجات الأولية مرة أخرى عندما تدخل اللب الداخلى.

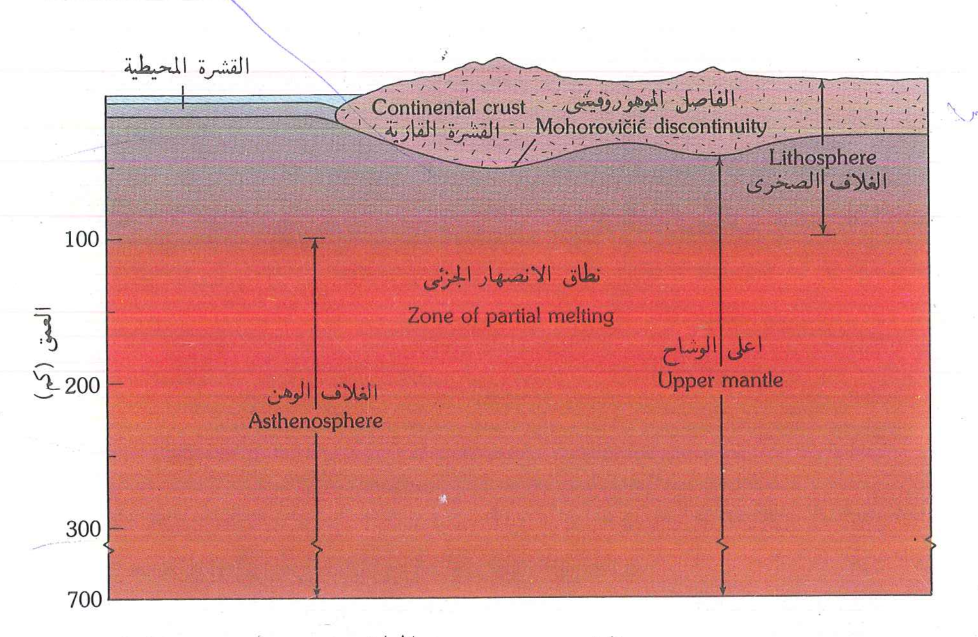
عن نشأة الجزر الواقعة داخل الأحواض العميقة للمحيطات.

الوشاح

يشكل الوشاح أكثر من 80% من حجم الكرة الأرضية وهو عبارة عن نطاق يبلغ سمكه 2885 كيلومترا من الصخور الممتدة من قاع القشرة (موهو) الى اللب الخارجي السائل. وتأتي معلوماتنا عن الوشاح من التجارب المعملية ومن فحص المواد المقتحمة للقشرة من تحتها. وعلى الأخص تلك الصخور المكونة لأنابيب الكامبرليت التى يوجد فيها الماس عادة. ويعتقد بأنها تنشأ فى أعماق تصل الى 200 كيلومتر. وهى جزء من داخل الوشاح. وتتكون صخور الكامبرليت هذه من البيريدوتيت وهو صخر يحتوى على السليكات الغنية بالحديد والماغنيسيوم. وهى أساسا عبارة عن معدنى الأوليفين والبيروكسين بالاضافة الى كميات أقل من الجارنيت. هذا ونظرا لأن الموجات الثانوية (ث) تنتقل بسهولة عبر الوشاح، فيصح الاستنتاج بأن الوشاح هو عبارة عن جسم صلب لدن ولذلك يوصف الوشاح بأنه نطاق صخرى صلب. ويتركب جزؤه العلوى من معادن البيريدوتيت. وكما هو متوقع فان هذه الصورة عن الوشاح غير متكاملة. وأى نموذج عملى للوشاح لا بد أن يفسر توزيع الحرارة المقدرة لهذا النطاق. وبينما تزداد درجة الحرارة بازدياد العمق فى القشرة، فان هذا الاتجاه لا يستمر الى أسفل حتى الوشاح. ولكن زيادة الحرارة مع العمق عبر الوشاح هى أكثر تدرجا وهذا يعنى أن الوشاح له قدرة عملية على نقل الحرارة الى خارجه. إذ لو كانت الحرارة تنتقل فى الوشاح عن طريق التوصيل كما هو الحال فى القشرة لكانت درجة حرارة الجزء الأسفل من الوشاح بالضرورة أكبر مئات الأضعاف من درجة حرارة الجزء العلوى منه، حيث أن توصيل الحرارة بواسطة الصخور يعتبر بطيئا جدا. ونتيجة لذلك فان لصخور الوشاح القدرة على التدفق تحت درجات الحرارة والضغط المتطرفينْ.

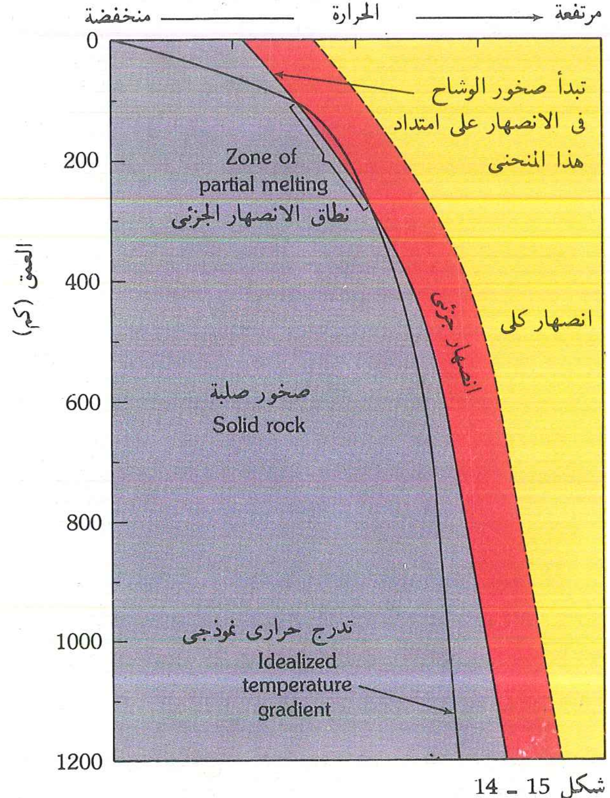
وإذا كان هذا صحيحا فكيف إذاً ينقل الوشاح الصخرى الموجات الثانوية (ث) التى لا تنتقل إلا عبر الأجسام الصلبة وفى نفس الوقت يتدفق كما لو كان سائلا؟ يمكن تفسير هذا التضارب الظاهرى اذا كانت المواد تتصرف كما لو كانت صلبة تحت ظروف معينة وكما لو كانت سائلة تحت الظروف الأخرى. ويصف الجيولوجيون المواد التى من هذا النوع باللدونة وهذا يعنى أنه عندما تتعرض المادة لضغوط عابرة مثل تلك التى تنشأ عن الموجات الاهتزازية، فانها تتصرف كما لو كانت جسما لدنا وصلبا ولكن عند تعرضها لضغوط مستديمة (لمدة طويلة) فان نفس هذه المواد الصخرية سوف تتدفق. هذا يفسر قدرة الموجات الثانوية على اختراق الوشاح. ولكن هذا النطاق لا يمكنه أن يخزن فى نفس الوقت الطاقة اللدنة مثل الجسم الهش ولذلك فهو ليس له القدرة على احداث الزلازل. وهذه الظاهرة غير العادية هى ليست بالطبع مقصورة على صخور الوشاح. فالمواد التى صنعها الانسان مثل عجينة طين الأطفال وعجينة الحلوى أيضا تمثل تصرُّفاً لَدِناً. وعند قرع هذه المواد بواسطة مطرقة فانها تتهشم مثل المادة الهشة ولكن عندما تجذب ببطء فانها تتدفق بلدونة. ويجب أن لا يؤخذ عن هذه الأمثلة أن الأرض مكونة من مواد رخوة كالعجينة ولكنها مكونة من صخور صلبة حمراء ساخنة وتحت ضغوط عالية غير معروفة على سطح الأرض، وهى تظهر قدرة على التدفق.

وقد أكدت مجهودات حديثة لسبر الجزء العلوى من الوشاح التخمينات السابقة التى تدعى بوجود تقسيمات أخرى. وأحد الأقسام الأكثر أهمية هو منطقة تقع بين عمقى 100 كيلومتر و 250 كيلومتراً، تسمى **نطاق السرعة المنخفضة**. فعندما تخترق موجات (ث) وموجات (و) هذه المنطقة، تظهر نقصا ملحوظا فى سرعتها (شكل 15 ـ 12). وأقرب الاحتمالات الذى يفسر البطء الملاحظ فى الطاقة الاهتزازية هو وجود صخور منصهرة. ويعتقد بأن هذه المادة المنصهرة توجد فى جيوب محددة كخليط بين صهارة وبلورات والتى لا يزيد مقدارها عن 10% من حجم المنطقة. ورغم



شكل 15 ـ 13

موقع الغلاف الوهن من الغلاف الصخرى.



شكل 15 ـ 14

العلاقة بين التدرج الحرارى المقترح للأرض ومنحنى درجات الانصهار لمواد الوشاح. ففى النطاق الواقع بين 100 كيلومتر و 250 كيلومترا تتعدى مواد الوشاح درجة انصهارها بقليل وهو ما يفسر وجود النطاق ذى السرعات المنخفضة.

وجود هذه المادة ذات السرعة البطيئة تحت القشرة المحيطية وتحت أجزاء من القارات الا أنها لا تحيط تماما بالأرض.

فمثلا يلاحظ انعدام وجودها تحت مناطق الدروع فى القارات. ويدعم اكتشاف منطقة السرعة المنخفضة الافتراض المذكور سابقا الذى يقول بوجود منطقة صخور ضعيفة تقع تحت عمق 100 كيلومتر (شكل 15 ـ 13). ويطلق على هذا الجزء المحتوى على المواد الضعيفة، **الغلاف الوهن**. وعلى عكس نطاق السرعة المنخفضة التى تنعدم تحت أجزاء من القارات، فيعتقد بأن الغلاف الوهن يكون نطاقا يحيط كليا بالأرض. هذا بالاضافة الى أن هذا النطاق الضعيف قد يصل فى بعض المناطق الى عمق 700 كيلومتر. ولكن الجزء الأعلى فقط منه هو الذى يحتوى على صخور منصهرة جزئيا. وكما يمكن مشاهدته فى شكل 15 ـ 14 فان هذا النطاق الضعيف موجود، لأن صخور هذا المستوى هى أقرب الى درجة الانصهار من الصخور التى فوقها أو التى تحتها. ولذلك فان صخور هذه المنطقة قابلة للتشكل مثلها فى ذلك مثل الحديد الأحمر الساخن.

وفوق الغلاف الوهن يقع نطاق هش بارد ذو سمك يصل حوالى 100 كيلومتر يسمى **بالغلاف الصخرى**

(شكل 15 ـ 12). ويشمل الغلاف الصخرى فى حقيقته القشرة الصخرية بأكملها كما يشمل أيضا الجزء العلوى من الوشاح ويعرَّف بأنه نطاق الأرض البارد الى درجة يتصرف عندها كجسم صلب هش.

ويعتقد بأن التقلبات داخل الغلاف الوهن الضعيف هى التى تسبب الحركة فى الغلاف الصخرى الصلب فوقه. ويعد اكتشاف هذا النطاق الضعيف مساهمة فعالة لنظرية تحرك الألواح، والتى تفترض أن ألواح الغلاف الصخرى تتحرك على امتداد سطح الأرض. ومن الجزء العلوى للغلاف الوهن تنشأ أيضا بعض الصخور المنصهرة المصاحبة للنشاط البركانى.

وعند عمق 400 كيلومتر تقريبا، تم اكتشاف زيادة مفاجئة فى سرعة الموجات الاهتزازية (شكل 15 ـ 12). وبينما يسود الاعتقاد بأن الزيادة فى السرعة عند الحد الفاصل بين القشرة والوشاح، ترجع الى تغير فى التركيب المعدنى؛ فانه يعتقد بأن الزيادة فى السرعة عند مستوى عمق 400 كيلومتر ناتجة عن تغير فى الطور (الحالة). ويحدث التغير فى الطور هذا عندما تغيّر المعادن من بنيتها البلّورية استجابة لتغيّر فى الحرارة أو الضغط أو الاثنين معا. وقد دلت التجارب المعملية على أن معدن الأوليفين (ما$_2$ح$_2$ س أ$_4$) الذى هو أحد المكونات الرئيسية لصخور البيريدوتيت سوف يتقلص الى معدن ضغط عال أكثر تراصا عند الضغوط السائدة فى هذه الأعماق. وقد يفسرٍّ هذا التغير التركيبى الزيادة المنتظرة فى سرعة الموجات الاهتزازية.

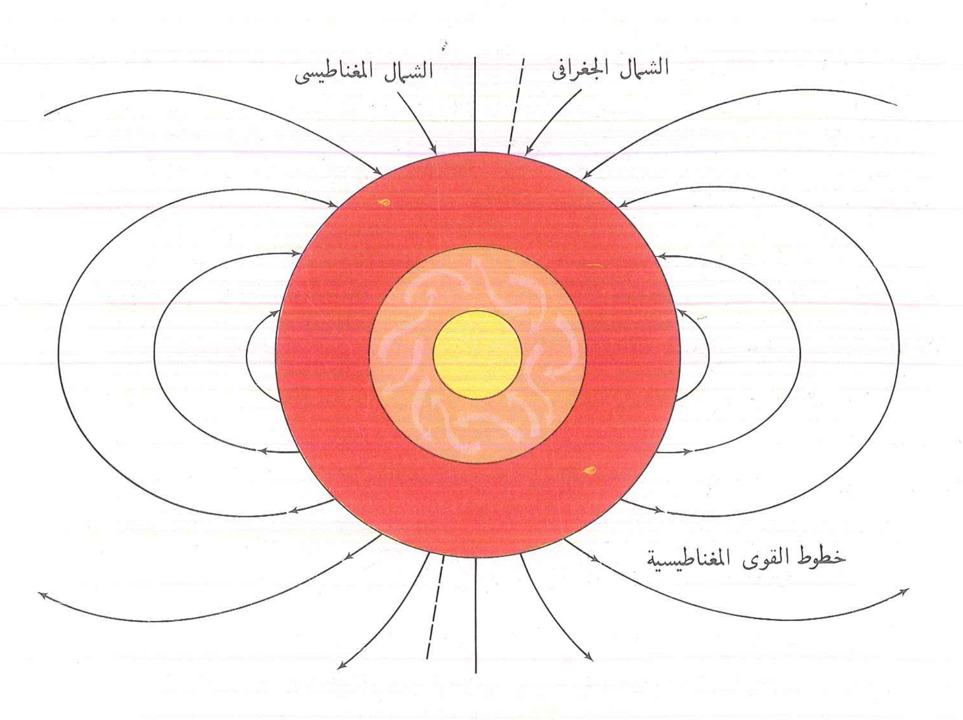
ويعتقد بأنه تم اكتشاف فاصل آخر عن طريق التفاوت فى سرعة الموجات الاهتزازية عند عمق 700 كيلومتر (شكل 15 ـ 12). اذ يعتقد بأنه عند هذا العمق تنفصل المعادن التى فى صخور البيريدوتيت وتتواجد على هيئة أكاسيد معدنية بسيطة ولذلك فانه بين عمق 700 كيلومتر وعمق 2885 كيلومترا، يعتقد بأن الوشاح يتكون أساسا من أكسيد الحديد (ح أ) وأكسيد الماغنيسيوم (ما أ) وثانى أكسيد السليكون (س أ$_2$) وذلك بدلا من معادن السليكات التى لها نفس التركيب الكيميائى.

اللب

وكما هو الحال بالنسبة للنطاقات التى تم تناولها بالوصف، فقد تم التحقق من وجود لب مركزى للأرض عن طريق المعلومات الاهتزازية. ولب الأرض الذى يمثل كرةً صماء بداخله يبلغ نصف قطرها 3486 كيلومترا. وهو بهذا الحجم يعد أكبر من كوكب المريخ. ويمثل لب الأرض، الذى يمتد من الطرف الداخلى للوشاح الى المركز حوالى سدس حجم الأرض وما يقرب من ثلث كتلتها. ويفوق الضغط عند مركز الأرض ضغط الهواء عند سطحها بملايين المرات، كما أن درجات الحرارة هناك قد قدرت ما بين 3000 و 5000 درجة مئوية. وبعد أن توفرت معلومات اهتزازية أدق، وجد أن اللب يتركب من نطاق خارجى سائل يبلغ سمكه 2270 كيلومترا وكتلة داخلية صلبة يبلغ نصف قطرها 1216 كيلومترا.

ومن خصائص اللب الأكثر أهمية هى كثافته العالية. إذ تزيد كثافته عند الحد الفاصل بينه وبين الوشاح عن عشرة أضعاف كثافة الماء. وعند المركز تبلغ كثافة اللب أكبر بمقدار 13.5 ضعفا من كثافة الماء، بحيث تصل الى الكثافة الهائلة التى حسبت لمواد اللب. ولا يعتقد بأن المعادن الشائعة بالقشرة من السليكات والتى لها كتلة تتراوح ما بين 26 ـ 35 ضعفا من كتلة الماء يمكن أن يكون لها تراصا، كافيا بحيث تعطى الكتلة الهائلة للب. ولذلك فقد اجريت محاولات عدة لتحديد المواد التى تمتلك هذه الخاصية.

ومن الغريب أن تزودنا النيازك بمعلومات هامة عن التركيب الداخلى للأرض. حيث أن النيازك هى جزء من النظام الشمسى فيمكن اعتبارها ممثلة للمواد التى تكونت أصلا منها الأرض، اذ يتراوح تركيبها بين الأنواع المعدنية التى تتألف أساسا من عنصر الحديد وبين النيازك الحجرية المكونة من مواد صخرية تشبه الى حد كبير صخور



شكل 15 ـ 15

يعتقد بأن نشأة الحقل المغناطيسى للأرض يعود الى الخلط الشديد المستمر لسبائك الحديد المنصهرة فى اللب الخارجى السائل.

البيريدوتيت. ونظرا لكون نسبة الحديد فى القشرة الأرضية أقل بكثير من وفرته النسبية فى الشظايا الآتية من النظام الشمسى، فقد استنتج الجيولوجيون من ذلك أن صلب الأرض لا بد أن يكون غنيا بهذه المادة الثقيلة. وعلاوة على ذلك، فالحديد هو المادة الوفيرة فى النظام الشمسى التى تمتاز بكثافة مناسبة. ورغم أنه يغلب على اللب التركيب الحديدى إلاّ أنه لا يمكن أن يكون نقيا. إذ تشير التجارب إلى أن كثافة الحديد النقى تحت الضغوط الشديدة المشابهة كما هو فى اللب تزيد بحوالى 10% عن الكثافة الحقيقية للحديد. ولتفسير هذه الحقيقة، فقد اقترح أن اللب لا بد أن يحتوى على بعض المعادن الأخف من الحديد، والتى تصنع منه سبيكة مما يقلل من كثافته. ومما يعزز هذا الرأى أن درجة حرارة اللب لا تصل الى درجة انصهار الحديد على أحسن تقدير. إذ لو كان اللب الخارجى مركبا من الحديد الخالص لتصلب منذ أمد بعيد ولكان ذلك مناقضا للمعلومات الاهتزازية المعروفة عنه. فكون اللب الخارجى سائلا يمكن تفسيره على أساس إضافة عناصر خفيفة من شأنها أن تخفض من درجة انصهار الحديد بعد اختلاطها به.

والعنصران اللذان يحتمل أن يصنعا سبيكة مع الحديد ويبرران كثافته الاختبارية وحالة سيولة اللب الخارجى، هما الكبريت والاكسجين. كما انه لا يشك فى وجود مواد أخرى بكميات قليلة من بينها السليكون والكربون.

ورغم أنه قد تأكد وجود لب مركزى معدنى التركيب للأرض، إلاّ أن الجهود المبذولة لتحديد ماهية هذا اللب لا تزال موضع تخمين. ويذهب أكثر التصورات قبولا الى القول بأن اللّب قد نشأ مبكرا فى تاريخ الأرض من كتلة كانت متجانسة فى تركيبها. هذا وقد تم تسخين الكتلة الأرضية برمتها اثناء فترة نموها بواسطة الطاقة الحرارية الناجمة عن المواد المتساقطة نحوها، حتى وصلت درجةالحرارة الداخلية للأرض فى وقت لاحق ارتفاعا يكفى لاستيعاب المواد المتجمعة فوقها. وقد تجمعت الكتل الثقيلة والغنية بالحديد وغاصت فى اتجاه المركز. وفى نفس الوقت، طفت المواد الخفيفة الى أعلى لتكون الوشاح وربما بعض أجزاء من القشرة. وخلال فترة جيولوجية قصيرة نسبيا، اكتسبت الأرض نطاقات تركيبية لا تختلف كثيرا عما هى عليه اليوم.

كيف إذاً نفسر وجود لب خارجى فى حالة سائلة فى الوقت الذى يوجد فيه اللب الداخلى فى حالة صلبة رغم أن درجة حرارته أشد؟ أغلب الظن أن اللب بقسميه كان سائلا فى مرحلة تكونه الأولى. وقد كانت هذه السبيكة الحديدية السائلة فى حالة خلط عنيف، بينما استمر انفصال مواد اللب عن بعضها ببطء خلال الثلاثة ونصف بليون سنة الماضية. وعندما بدأ اللب يبرد انتقل جزء من المركبات الحديدية الى أسفل بينما طفت المركبات الخفيفة الى أعلى فى اتجاه حافة اللب. وقد بدأت المركبات الحديدية الهابطة فى التصلب بعد أن فقدت العناصر الخفيفة التى تخفض من درجة الانصهار. هذا كما ينشأ عن هبوط المواد الثقيلة الى أسفل وتبلرها طاقة جذب وحرارة التحام وهذان بدورهما يعملان على توليد تيارات مستمرة فى النطاق السائل فوقها.

كما يدعم تصورنا للّب من حيث كونه كرة صلبة داخلية يُحيط بها غلاف سائل متحرك، وجود حقل مغناطيسى للأرض كما لو وضع بداخلها عمود مغناطيسى ضخم. وكلنا يعلم أنه لا يمكن أن يكون مصدر الحقل المغناطيسى معدنا دائم المغنطة لأن درجة حرارة جوف الأرض لا تسمح باحتفاظ المواد بمغناطيسيتها. اذ تتطلب الطريقة الوحيدة التى يمكن قبولها لتفسير المجال المغناطيسى للأرض، أن يكون لب الأرض من مادة موصلة للكهرباء مثل الحديد وفى حالة سائلة لدرجة الجريان (شكل 15 ـ 15). ويتوفر كلا هذين الشرطين فى نموذج لب الأرض المستمد من المعلومات الاهتزازية.

أسئلة للمراجعة :

1 ـ عدد الفروق الأساسية بين الموجات الأولية (و) والموجات الثانوية (ث).

2 ـ كيف يختلف الحد الفاصل بين القشرة والوشاح (الموهو) عن الحدين الفاصلين اللذين يقعان عند أعماق حوالى 400 كيلومتر و700 كيلومتر من سطح الأرض؟

3 ـ صف الغلاف الصخرى. ما هو الاختلاف المهم بينه وبين الغلاف الوهن؟

4 ـ صف التركيب الكيميائى (المعدنى) للنطاقات الأربعة الأساسية للأرض؟

5 ـ لماذا كان من الصعب على العلماء المتخصصين الحصول على معلومات دقيقة متعلقة بزمن انتقال الموجات قبل نهاية القرن الماضى؟

6 ـ صف بدقة الطريقة التى استعملت لأول مرة لقياس حجم اللب الداخلى للأرض.

7 ـ كيف أمكن الحصول على عينات من مكانها فى قاع أعماق المحيطات لأول مرة؟

8 ـ ما هو الدليل الذى أتى به جوتنبرج ليبرهن على وجود لب مركزى للأرض؟

9 ـ لو فرضنا أن المنطقة الضحلة للموجات الأولية (و) تقع بين 120 ° و160 ° بدلا من 105 ° و140 ° ما دلالة ذلك على حجم اللب؟

10 ـ اشرح لماذا يستطيع الغلاف الوهن أن يتدفق مثل السوائل، فى الوقت الذى تنتقل فيه الموجات الثانوية (ث) التى لا تستطيع الانتقال عبر السوائل؟

11 ـ لماذا تعتبر النيازك دلالات مهمة على تركيب جوف الأرض؟

12 ـ ما هو الدليل المستمد من علم الاهتزازات على سيولة اللب الخارجى؟ وما هى الأدلة الأخرى التى تؤكد سيولة اللب الخارجى؟

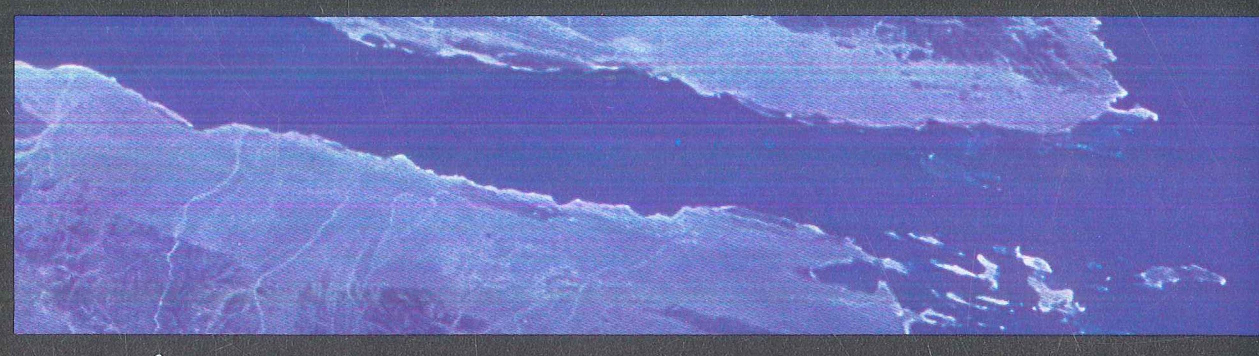
13 ـ لماذا يمكن للب الخارجى أن يوجد على حالة سائلة بينما يوجد اللب الداخلى على حالة صلبة رغم ارتفاع درجة حرارته؟

14 ـ فى الفصل السابق أشير الى أن الزلازل تقع فقط فى الصخور الهشة القادرة على تخزين الطاقة المرنة، أما تحت عمق 100 كيلومتر فان الصخور ضعيفة القوام وتتدفق بحرية عندما تتعرض للضغط. كيف إذاً يمكن تفسير الزلازل ذات البؤ ر العميقة؟

الكلمات الدالة :

غلاف صخرى	lithosphere
غلاف وهن	asthenosphere
فاصل موهوروفيشك أو موهو	Moho discontinuity
قشرة	crust
لب داخلى	inner core
لب خارجى	outer core
نطاق سرعة منخفضة	low velocity zone
نطاق ظل	shadow zone
وشاح	mantle

16



حركيـة الألـواح



16

إنجراف القارات: فكرة سبقت زمانها

- التوافق الشكلى لحواف القارات
- الدليل الاحاثى
- تشابه أنواع الصخور والتراكيب
- الدليل المستمد من المناخ القديم

المناظرة الكبيرة

إنجراف القارات والمغناطيسية القديمة

بداية ثورة علمية

- إنفراج قاع البحر
- معكوسات المغناطيسية الأرضية

حركية الألواح: تقديم جديد لفكرة قديمة

حواف الألواح

- الحواف المتباعدة
- الحواف المتقاربة
- فوالق التحويل

إختبار النموذج

- حركيةالألواح والزلازل
- أدلة من مشروع الحفر بأعماق البحار
- البقع الساخنة

الميكانيكية المحركة

لقد ساد الاعتقاد بين الجيولوجيين فى أوائل هذا القرن بقدم أحواض المحيطات الترسيبية، بل إن معظمهم قد قبل بفكرة ديمومة القارات والمحيطات. وقد كانوا يعتقدون بأن الجبال قد تكوّنت بفعل انكماش الأرض بفقدانها التدريجى للحرارة، حيث كان يعتقد بأنها كانت منصهرة فى مجملها فى وقت ما. وبانخفاض درجة حرارة باطنها وإنكماشه تشكّلت قشرتها الخارجية الصلبة وانثنت لتناسب الكوكب المنكمش. وعليه فقد كان ينظر الى الجبال بأنها تشابه التجاعيد على سطح فاكهة جافة. وبالرغم من عدم ملائمة هذا النموذج حول عمليات تكتونية الأرض إلا أنه قد بقى راسخا فى التفكير الجيولوجى لذلك الوقت. وقد تمّ تفسير حتى التغيّر فى مستوى سطح البحر، الذى كان واضحا من البقايا الأحاثية البحرية بعيدا داخل القارات، وذلك باستعمال نموذج الأرض المتقلصة تدريجيا. وقد قيل وقتها بأن تشكّل قشرة الأرض الخارجية قد خسف بعض المناطق حيث غمرتها البحار وبرزت مناطق أخرى فوق مستوى سطح البحر لتصبح جزءاً من اليابسة.

وقد حدث تطوّر هائل خلال العقود الزمنية القليلة الماضية فى علوم الأرض، وذلك لتراكم العديد من المعلومات الجديدة، مما غيرّ جذريا فى مفهومنا حول تركيب الأرض والعوامل المؤثرة فيها. وقد أدرك علماء الأرض الآن بأن مواقع الكتل الأرضية ليست ثابتة، بل إنها تتحرك على الكرة الأرضية بالتدريج. وقد أدى إنشطار الكتل القارية الى تكوين أحواض محيطية جديدة بينما تغوص الأجزاء القديمة من قيعان المحيطات داخل الخنادق المحيطية العميقة. وفى ذات الوقت ارتطمت أجزاء أخرى من الكتل القارية المنفصلة وكونت سلاسل الأرض الجبلية الكبيرة. وباختصار فقد ولد نموذج جديد لتكتونية الأرض يختلف تماما عما كان مقبولا منذ عقود قليلة.

وقد وصف هذا التبدّل فى التفكير العلمى بكونه ثورة علمية. وقد مضى زمن طويل منذ بداية هذه الثورة قبل التسليم بها شأنها فى ذلك شأن الثورات العلمية الأخرى. وقد بدأت هذه الثورة العلمية خلال الجزء الباكر من القرن العشرين، باقتراح واضح يقول بأن القارات قد إنجرفت حول سطح الأرض. وبعد نقاش حاد دام سنوات عدّة حول فكرة إنجراف القارات، رفضها السواد الأعظم من علماء الأرض وعلى الأخص جيولوجيو أمريكا الشمالية ربما لأن معظم الأدلة قد جاءت من نصف الكرة الأرضية الجنوبى. وهذه الحقيقة تعكسها المعلومات القليلة الواردة فى النشرات

شبه جزيرة سيناء، تحيط بها صدوع يعتقد أنها تكوّنت بفعل إنفراج قاع البحر.

العلمية بالولايات المتحدة بين سنة 1930 وسنة 1950. غير أنه خلال الخمسينات والستينات من هذا القرن برز دليل جديد بعث الروح ثانية فى هذا المقترح المنسى. وبحلول سنة 1968 أدت هذه التطورات الى ظهور نظرية جديدة اكثر شمولية من الانجراف القارى تعرف بنظرية حركية الألواح.

وسنتعرض فى هذا الفصل الى التطورات التى أدت الى هذا التبدل الجذرى فى التفكير العلمى وذلك فى محاولة للتعريف بتطور العلم. وسنتتبع باختصار التطورات التى حدثت منذ إقتراح فكرة إنجراف القارات الى مرحلة القبول العام بنظرية حركةالألواح. كما سنقدم أيضا الأدلة المؤيدة لهذه الفكرة.

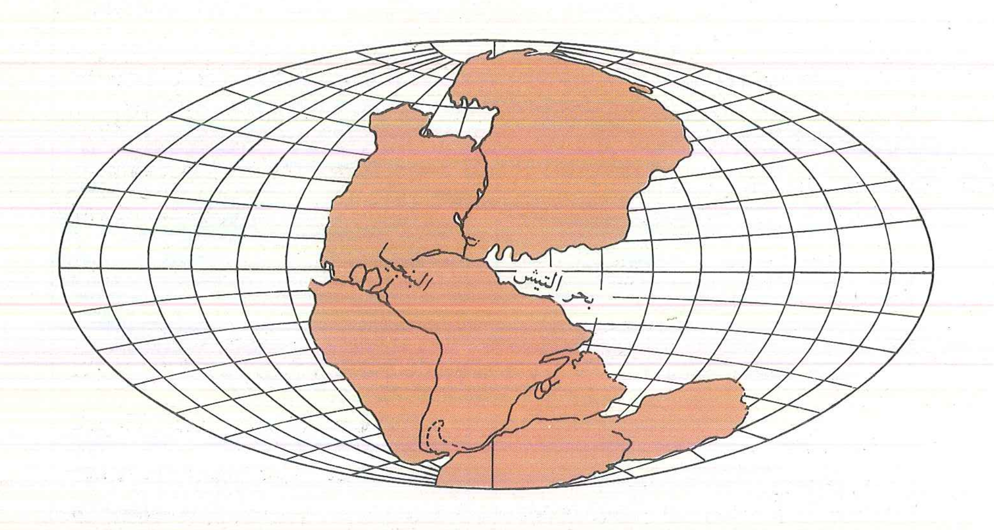
إنجراف القارات: فكرة سبقت زمانها

لقد برزت فكرة التوافق الشكلى لحواف القارات وعلى الأخص أمريكا الجنوبية وأفريقيا فيما يشبه لعبة أحجية الصور المقطوعة مع بداية خروج خرائط العالم الأكثر دقة. ولم تعط هذه الفكرة أهمية تذكر حتى سنة 1915 عندما نشر ألفرد واغنر عالم الأرصاد والجيوفيزياء الألمانى شرحاً مفصلاً لمحاضرة سبق وأن ألقاها سنة 1912 ، وذلك فى كتابه الذى صدر بعنوان أصل القارات والمحيطات. وقد تقدم هنا واغنر بالخطوط العريضة لأساس نظريته المتطرفة التى عرفت بنظرية انجراف القارات. وقد كانت إحدى معتقداته الرئيسية تقول بسبق وجود قارة عظمى أسماهاالبنجيا ـ تعنى كل اليابسة ـ (شكل 16 ـ 1). وقد زاد على ذلك قوله بأن هذه القارة العظمى قد بدأت فى الانشطار الى قارات أصغر حوالى 200 مليون سنة مضت. ومن ثمَّ إنجرفت هذه القارات الصغيرة الى مواقعها الحالية. وقد قام واغنر وأتباعه بجمع الكثير من الأدلّة التى تساند هذا الادعاء. وقد بدا أن التوافق الشكلى لحواف أمريكا الجنوبية وأفريقيا، والتشابه فى المناخ القديم، والدليل الأحاثى، الى جانب التراكيب الصخرية، كل ذلك قد ساند الفكرة القائلة بأن هذه الكتل القارية قد كانت وحدة واحدة فى يوم من الأيام.

التوافق الشكلى لحواف القارات

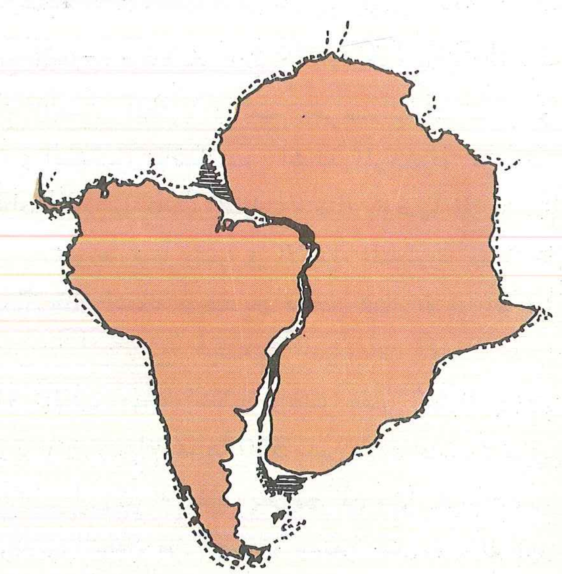
لقد لفت نظر واغنر فى البداية الشبه بين حواف القارات المتقابلة على جانبى جنوب المحيط الأطلسى شأنه فى ذلك شأن بعض الآخرين من قبله، مما جعله يرى إحتمالية أنها كانت متصلة ببعضها البعض. ولكن محاولته إعادة تركيب جانبى المحيط باستعمال الشواطى الحالية سرعان ما لقى معارضة من باقى علماء الأرض الذين أصابوا فى قولهم بأن الشواطىء عرضة للتغيّر الدائم نتيجة لعوامل التعرية. وقد استبعدوا نتيجة لذلك التوافق التام بين حواف القارات حتى لو أنهم سلموا بفكرة الانجراف هذه. وبالاضافة الى ذلك فان الدليل الأحاثى الوفير يشير الى أن معظم كتل اليابسة حول العالم قد تعرضت إما الى الرفع أو الخسف خلال الفترة الأخيرة من التاريخ الجيولوجى، مما ترتب عليه إعادة تشكيل الشواطىء القارية. ويبدو أن واغنر كان منتبها الى هذه المشاكل. وقد كان فى الحقيقة مقترحه الأصلى لما يشبه لعبة أحجية الصور المقطوعة غير ناضج.

ولقد وجد أن الحواف الخارجية للرف القارى تمثل حدودا أكثر دقة للقارات. وتقع حواف الأرفف القارية اليوم تحت أعماق تبلغ المئات من الأمتار تحت مستوى سطح البحر. وقد حاول ادوارد بولارد فى أوائل الستينات مع إثنين من مساعديه مطابقة القارات لبعضها البعض باستعمال الحاسوب عند عمق 900 مترا. ويوضح الشكل 16 ـ 2 التوافق الواضح فى شكل القارات عند ذلك العمق. وبالرغم من أن القارات قد تراكبت هنا فى بعض أجزائها إلا أن تلك المواقع تمثل أماكن تراكم كميات هائلة من الرسوبيات الناتج عن عمل بعض الأنهار، مما عمل على زيادة مساحة بعض القارات. ولقد كانت النتيجة التى وصل اليها بولارد وزميليه فى محاولتهم هذه أحسن مما كان يتوقعه مناصرى هذه النظرية.



شكل 16 ـ 1

إعادة تركيب البنجيا كما يعتقد أنها كانت عليه حوالى 200 مليون سنة مضت.

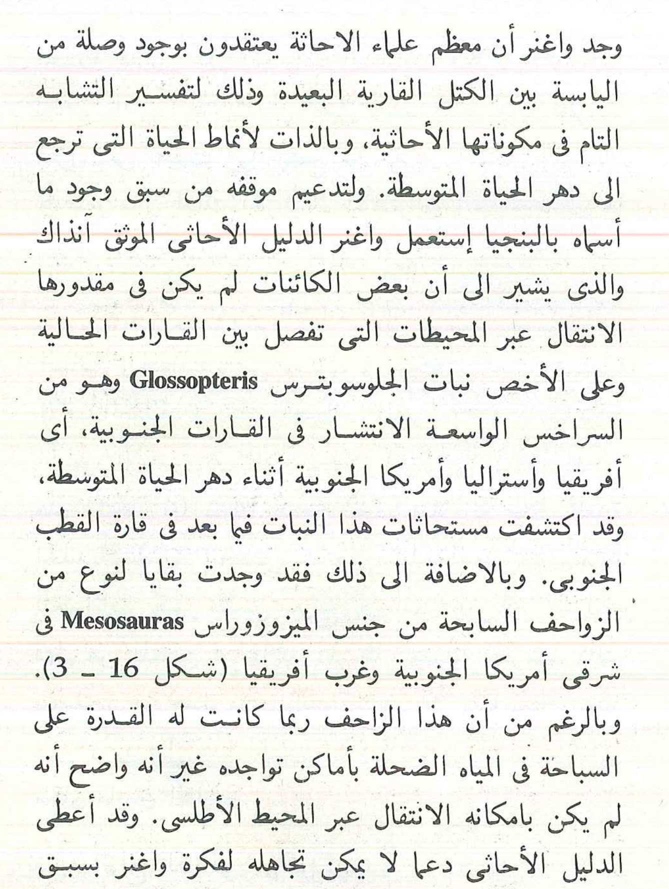


شكل 16 ـ 2

إعادة تركيب قارتى أمريكا الجنوبية وأفريقيا عند حدود المنحدر القارى على عمق 500 قامة (حوالى 900 متر).

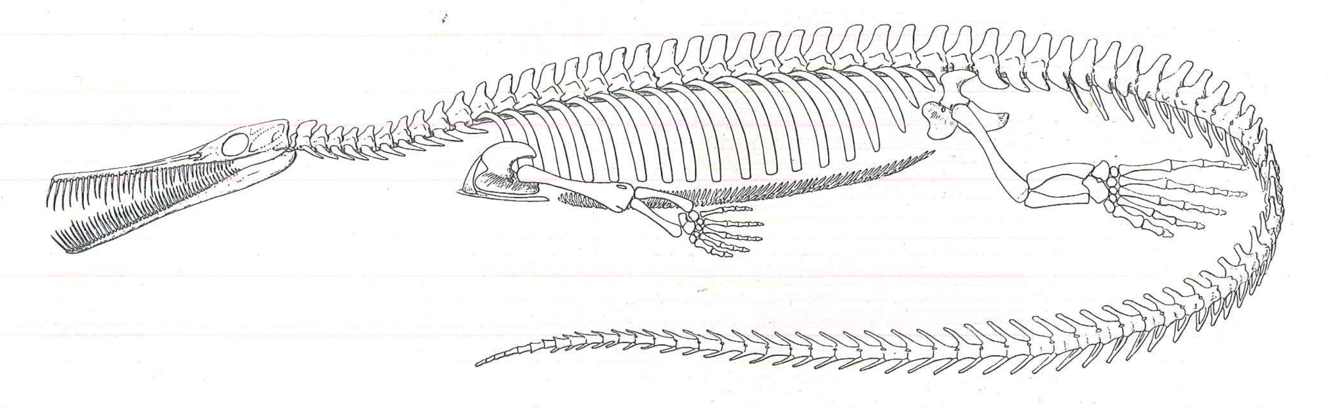
الدليل الآحاثى

وبالرغم من أن التوافق الشكلى لشاطِئَىْ الأطلسى قد أثار إنتباه واغنر ولكنه لم ير أمر حركية القارات ممكنا حتى عثر على مقالة تشير الى الدليل الأحاثى القائل بوجود نوع من الجسر الأرضى بين أمريكا الجنوبية وأفريقيا. وبقراءته



وجد واغنر أن معظم علماء الاحاثة يعتقدون بوجود وصلة من اليابسة بين الكتل القارية البعيدة وذلك لتفسير التشابه التام فى مكوناتها الأحاثية، وبالذات لأنماط الحياة التى ترجع الى دهر الحياة المتوسطة. ولتدعيم موقفه من سبق وجود ما أسماه بالبنجيا إستعمل واغنر الدليل الأحاثى الموثق آنذاك والذى يشير الى أن بعض الكائنات لم يكن فى مقدورها الانتقال عبر المحيطات التى تفصل بين القارات الحالية وعلى الأخص نبات الجلوسوبترس **Glossopteris** وهو من السراخس الواسعة الانتشار فى القارات الجنوبية، أى أفريقيا وأستراليا وأمريكا الجنوبية أثناء دهر الحياة المتوسطة، وقد اكتشفت مستحاثات هذا النبات فيما بعد فى قارة القطب الجنوبى. وبالاضافة الى ذلك فقد وجدت بقايا لنوع من الزواحف السابحة من جنس الميزوزوراس **Mesosauras** فى شرقى أمريكا الجنوبية وغرب أفريقيا (شكل 16 ـ 3). وبالرغم من أن هذا الزاحف ربما كانت له القدرة على السباحة فى المياه الضحلة بأماكن تواجده غير أنه واضح أنه لم يكن بامكانه الانتقال عبر المحيط الأطلسى. وقد أعطى الدليل الأحاثى دعما لا يمكن تجاهله لفكرة واغنر بسبق وجود قارة البنجيا.

وقد تعرض واغنر أيضا فى كتابه الى توزيع الكائنات



شكل 16 ـ 3

رسم لهيكل مستحاثة الميسوسوراس . يبدو أن بقايا مستحاثات هذا الكائن التى وجدت على قارتى أفريقيا وأمريكا الجنوبية يبدو انها تربط بين هاتين الكتلتين من اليابسة أثناء دهر الحياة المتوسطة.

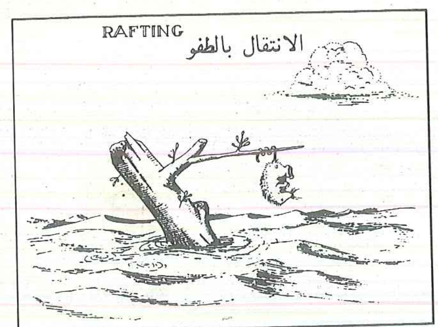
الحديثة كدليل على إنجراف القارات. فمثلا الكائنات الحديثة التى انحدرت من أصل واحد لا بد وأنها تطورت بمعزل عن بعضها أثناء بضع من ملايين السنين الماضية. وأوضح مثال لذلك الجرابيّات الأسترالية التى وجد أن لها علاقة إحاثية مباشرة مع الجرابىّ الأبوسوم الأمريكى.

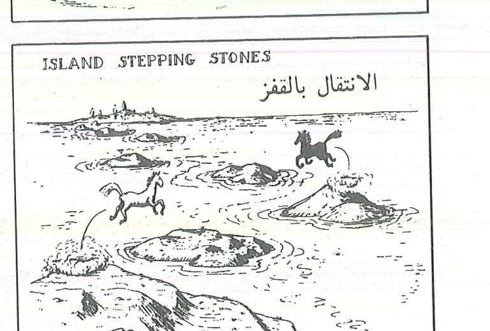
كيف يمكن تفسير التشابه الواضح بين المستحاثات النباتية والحيوانية والتى وجدت فى مواقع تبعد عن بعضها آلاف الكيلومترات عبر المحيطات المفتوحة؟ وقد كانت فكرة الجسور الأرضية بين القارات أكثر قبولا لحل مشكلة الهجرة هذه (شكل 16 ـ 4). فنحن نعرف مثلا أنه خلال الفترة الجليدية الحديثة إنخفض مستوى سطح البحر مما سمح للحيوانات بعبور مضيق بيرنج بين آسيا وأمريكا الشمالية. فهل من الممكن أن قارتى أمريكا الجنوبية وأفريقيا كانتا متصلتين عبر جسر من اليابسة؟ نحن الآن على يقين بعدم سبق وجود مثل هذا الجسر وإلا كانت بقاياه موجودة فى مكان ما بين القارتين.

تشابه أنواع الصخور والتراكيب

لا بد أنه كان جليا لكل من جرب لعبة أحجية الصور المقطوعة أنه ليس المطلوب فقط التوافق فى تركيب القطع، ولكن المطلوب أيضا هو التناسق والاستمرارية فى الصورة عامة. والصورة المطلوبة فى لعبة إنجراف القارات تتمثل فى أنواع الصخور والسلاسل الجبلية الموجودة على هذه القارات. فاذا ما كانت القارات متصلة ببعضها فلا بد من تشابه صخورها نوعا وعمرا فى الأجزاء المتجاورة. فمثلا قد وجد أن هذا التشابه موجود بين صخور شمال غربى أفريقيا وشرقى البرازيل. وقد أوضحت الدراسات الحديثة لهذا الدليل القديم صحة إعتقاد واغنر. ففى كلا المنطقتين وجدت صخور يبلغ عمرها 550 مليون سنة مجاورة لأخرى ترجع الى بليونى سنة مضت بطريقة كان فيها الحد الفاصل بين هذين النوعين من الصخور مستمرا عند وضع القارتين متجاورتين (شكل 16 ـ 5).

ودليل آخر لتصوير انجراف القارات هو السلاسل الجبلية التى تنتهى عند ساحل احد القارات لتظهر ثانية فى كتلة قارية أخرى عبر المحيط. فمثلا سلسلة جبال الأبالاش ذات الاتجاه شمال شرقى شرق الولايات المتحدة تنتهى عند شاطىء نيوفوندلاند. وتوجد جبال مشابهة لها فى العمر والتراكيب بجرينلاند وشمال أوروبا. وعند إعادة تركيب هذه الكتل القارية كما يوضح الشكل 16 ـ 1 تكوّن هذه السلاسل الجبلية حزاما متواصلا تقريبا. وتوجد العديد من

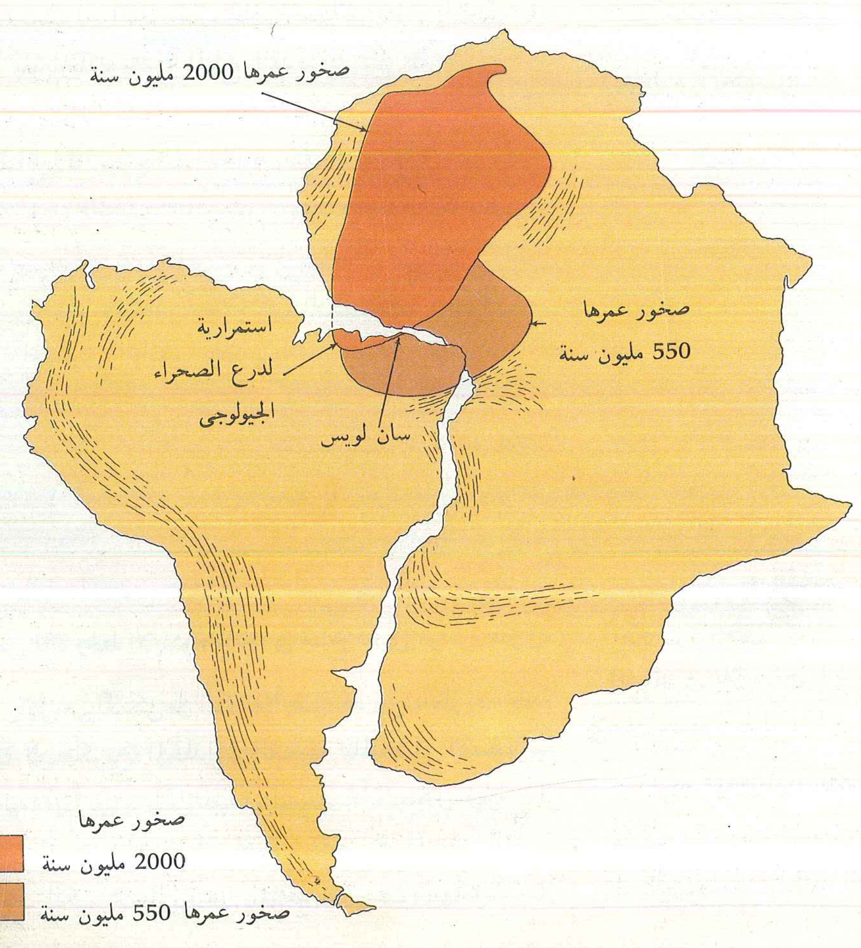






شكل 16 ـ 4

رسومات تخطيطية لجون هولدن توضح عدة تفسيرات لظاهرة وجود انواع متشابهة من الأحياء على كتل من اليابسة بعيدة كل البعد عن بعضها فى الوقت الحاضر.



شكل 16 ـ 5

إعادة تركيب أفريقيا وأمريكا الجنوبية وهى توضح التشابه فى عمر الصخور بين القارتين.

التراكيب الصخرية التى يظهر أنها متزامنة فى تكوّنها وتم فصلها بعد ذلك.

وقد كان واغنر جدّ مقتنع بهذا الشبه فى التراكيب الصخرية على جانبى المحيط الأطلسى. وقد ذهب الى أبعد من ذلك حين إقترح مخطئا أن الركام الجليدى بأمريكا الشمالية يوافق ذلك الموجود بأوروبا الشمالية حيث قال: نحن بعملنا هذا وكأننا نقوم بإعادة قطع ورق الجريدة الممزقة الى سابق مكانها، وفى كل مرّة ننظر فيما إذا كانت السطور متناسقة عبر الأجزاء الممزقة، واذا ما كانت كذلك ليس هناك ما نخلص اليه إلا كون أن هذه الأجزاء قد رجعت الى مواقعها الأصلية.

الدليل المستمد من المناخ القديم

وحيث أن ألفرد واغنر كان إخصائى مناخ بالخبرة فقد اهتم بالمعلومات حول المناخ القديم لدعم نظريته. وقد توجت مجهوداته هذه بعثوره على دليل لما يبدو أنه تغيرّ هائل فى المناخ. فالرسوبيات الجليدية مثلا قرب نهاية دهر الحياة القديمة (بين 220 و 300 مليون سنة مضت) دلت على أن ملاءات جليدية قد غطت مساحات واسعة من نصف الكرة الجنوبى. وقد وجدت طبقات من الرسوبيات الجليدية عند نفس المستوى الطبقى بجنوب القارة الأفريقية وأمريكا الجنوبية والهند وأستراليا. وتوجد تحت هذه الرسوبيات خدوش وأثلام على الصخور. وقد بينت هذه الخدوش والأثلام فى بعض المواقع أن الجليد قد تحرك من البحر الى اليابسة (شكل 16 ـ 6). وتقع الآن معظم المناطق التى وجد بها الدليل الجليدى الأخير من دهر الحياة القديمة بين خط عرض 30 وخط الاستواء وذلك فى مناخ قارى أو شبه قارى.

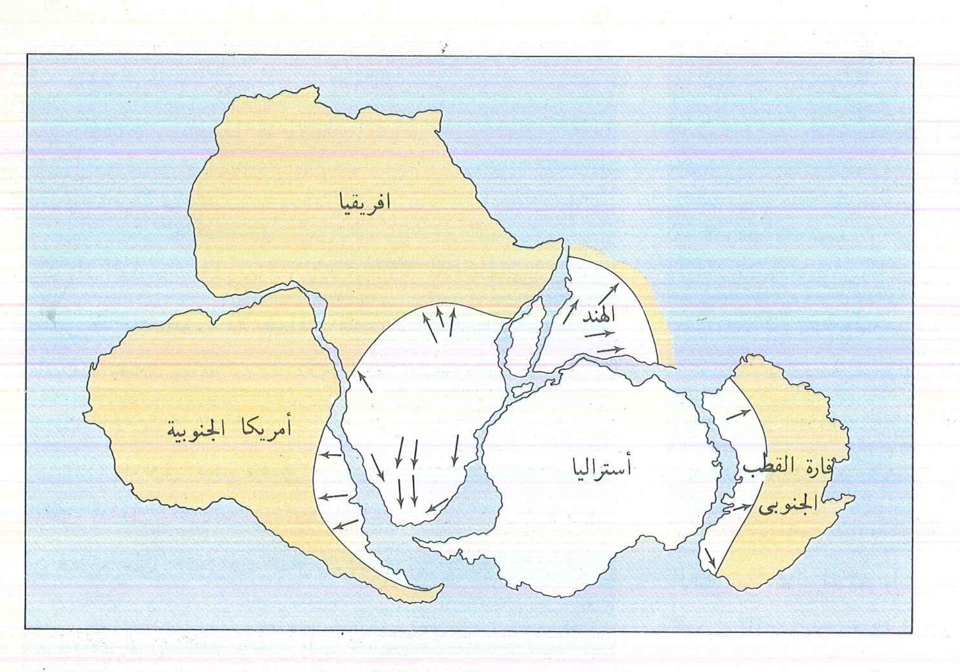
فهل من الممكن أن الكرة الأرضية قد مرّت بظروف باردة أدت الى تكوين المجلدات القارية بالمناطق الاستوائية الحالية؟ لم يقبل واغنر بهذا التفسير لأنه خلال نهاية دهر الحياة القديمة كانت هناك بحيرات كبيرة فى المناطق القارية بنصف الكرة الشمالى، وهى المواقع التى نمت فيها الأشجار التى كونت فيما بعد تراكمات الفحم شرقى الولايات المتحدة وأوروبا وسيبيريا. وكما إقترح واغنر يمكن تفسير هذه الظاهرة بإعادة تركيب الكتل القارية فى قارة واحدة وازاحتها قليلا تجاه القطب الجنوبى. وهذا كفيل بتهيئة الظروف اللازمة لتكوّن الجليد فوق جلّ نصف الكرة الجنوبى وفى نفس الوقت تسببت هذه الحركة فى تقريب الكتل الأرضية الشمالية من خط الاستواء ووضعها فى موقع مناسب لتكوين هذه الرواسب الفحمية الهائلة.

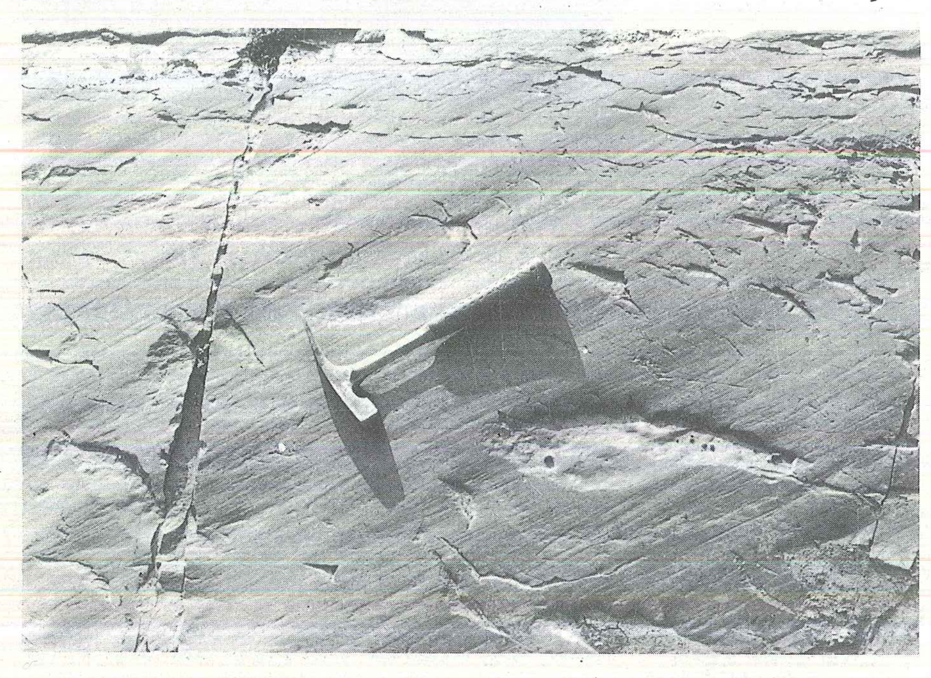
كيف تكوّن الجليد فى مناخ أستراليا الجاف والحار؟ كيف استطاعت الحيوانات البرية الهجرة عبر المسافات الهائلة من مياه البحر؟ وبقدر ما كان هذا الدليل مقنعا فلقد مرّت خمسون سنة قبل أن يقبله المجتمع العلمى ويسلم بالنتائج المقنعة التى أدى إليها.

المناظرة الكبيرة

لم تتعرض نظرية واغنر الى كثير من النقد حتى سنة 1924 عندما ترجم كتابه الى الانجليزية. ومنذ ذلك الوقت حتى وفاته سنة 1930 تعرضت نظريته حول إنجراف القارات الى الكثير من النقد اللاذع. فقد كتب ر. ت. شامبرلن الجيولوجى الأمريكى المعروف هازءا يقول: إن فرضية واغنر غير مشدودة الوثاق بصورة عامة، فقد تجاوزت حدود اللياقة فى حق كوكبنا، فهى إما سائبة القيد أو مُحكَمَة بحقائق تزيد فى بشاعتها عن جميع النظريات المنافسة لها. ويكمن سر فتنتها فى أنها لعبة لا تحكْمها العديد من القواعد أو اللوائح المقيدة. وقد عبر و. ب. سكوت الرئيس السابق لجمعية الفلاسفة الأمريكيين عن الرأى السائد فى بلاده نحو فكرة الانجراف القارى فى كلمات أقل حين وصفها بقوله أنها هراء ملعون.

وقد كانت أحد العقبات أمام فرضية واغنر هو فشله فى تقديم ميكانيكية لعملية الانجراف القارى. فقد إقترح واغنر إحتمالين كمصدر لطاقة الانجراف. أحدهما ظاهرة المد والجزر





شكل 16 ـ 6

(أ) ـ إتجاه حركة الجليد فى جنوب القارة العظمى المسماة جندوانالاند من قبل واضعى أسس فكرة إنجراف القارات.

(ب) ـ خطوط جليد على سطح الطبقات الصخرية بجنوب أستراليا وهى تبين إتجاه حركة الجليد.

تحت تأثير القمر والتى اعتقد واغنر أنها من القوة بحيث تستطيع تحريك القارات تجاه الشرق. وقد جادل هنا هارولد جفرى الفيزيائى الشهير بقوله أن نتائج ظاهرة المد والجزر إذا ما كانت بالقوة اللازمة لتحريك القارات فهى ستعمل على إيقاف حركة دوران الأرض فى بحر سنين قليلة. وقد قال واغنر كذلك أن القارات الضخمة قد إنشطرت خلال القشرة المحيطية ولكنه لا يوجد دليل بأن قاع المحيط كان من الضعف بحيث يسمح بمرور القارات دون تأثرها بوضوح أثناء ذلك. وحتى سنة 1929 كان النقد منصبا على أفكار واغنر من كل أوساط المجتمع العلمي. وبالرغم من كل ذلك

قام واغنر بكتابة طبعته الرابعة والأخيرة لكتابه محافظا على مفهوم نظريته ومضيفا لها الأدلّة المساندة. وفى سنة 1930 قام واغنر برحلته الثالثة والأخيرة لملائة جرينلاند الجليدية. وبالرغم من أن إهتمامه الأساسى كان منصبا على دراسة مناخ الشتاء القارص بالجزيرة المغطاة بالجليد ولكنه أراد أيضا أن يختبر نظريته حول الانجراف القارى. فقد رأى واغنر أن بامكانه تحديد مواقع معينة يمكن قياس التغير بها على مدى سنوات. ومن هنا يمكنه إثبات إنجراف جرينلاند غربا نسبة الى أوروبا. وفى شهر نوفمبر من سنة 1930 هلك واغنر مع مرافق له أثناء عودته من محطة تجارب وسط جرينلاند، غير أن فكرته حول إنجراف القارات بقيت ولم تنتهى بانتهائه.

لماذا لم يستطع واغنر قلب معتقدات عصره؟ فبالرغم من أن فرضيته كانت صحيحة فى الأساس غير أنها حوت الكثير من التفاصيل الخاطئة. فمثلا لم تنشطر القارات عند قاع المحيط، كما أن طاقة المد والجزر لم تكن المحرك لانجراف القارات. ولتلقى أية فكرة علمية القبول من الجميع لا بد لها من أدلة تدعمها من باقى المجالات العلمية. ولقد أدرك واغنر نفسه ذلك حين قال مجيبا منتقديه، أنه يبدو أن العلماء لم يتفهموا بما فيه الكفاية أن جميع أفرع علوم الأرض لا بد وأن تشارك فى إماطة اللثام عن طبيعة كوكبنا خلال الأزمنة الغابرة، ولن نستطيع الوصول الى حقيقة الأمر إلا بجمع كل هذه الأدلة. وقد كانت مشاركة واغنر فى تفهمنا للارض تفتقر الى جميع الأدلة المطلوبة كما وضعها وعليه فإنها لم تصمد. ولا بد وأن واغنر كان قد أجاب بنفسه على السؤال الذى كان لزاما أن سأله وهو: لماذا لم يقبلوا بمقترحاته؟

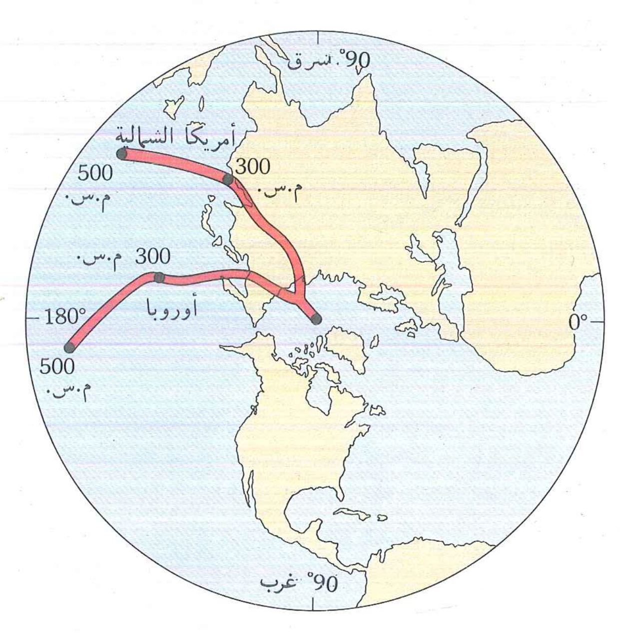
وبالرغم من أن معظم معاصرى واغنر كانوا قد إختلفوا معه معارضين لأفكاره والى درجة السخرية منها على الملأ فان البعض قد اعتبرها جديرة بالاهتمام، ومنهم الجيولوجى الكسندر دو توات من جنوب أفريقيا والاسكتلندى المعروف آرثر هولمز. فقد نشر دو توات فى سنة 1937 كتاباً بعنوان قاراتنا المتجولة والذى تفادى فيه البعض من أخطاء واغنر، وأضاف الكثير من الأدلة المدعمة لهذه الفكرة المتطورة. أما آرثر هولمز فقد شارك فى هذا الشأن باقتراحه ميكانيكية محركة للانجراف القارى. فقد رأى هولمز فى كتابه بعنوان الجيولوجيا الطبيعية أن تيارات الحمل العاملة داخل الوشاح هى المسئولة عن دفع القارات فى حركتها. وبالرغم من أنه حتى فى يومنا الحاضر لم يتفق الجيولوجيون على طبيعة الميكانيكية المحركة للانجراف القارى إلا أن ما اقترحه هولمز لا زال أحد الفرضيات المقبولة.

ولقد أصبحت فكرة حركة القارات الدائبة تشد الكثيرين ممن استمروا فى بحثهم للكشف عن كنهها فى الوقت الذى يرى فيها الكثيرون حلاً للظواهر التى لم يجدوا لها تفسيرا آخر.

أنجراف القارات والمغناطيسية القديمة

لم يطرأ جديد يذكر على فرضية واغنر للانجراف القارى منذ وفاته سنة 1930 حتى أوائل الخمسينات. فلم نكن نعلم الكثير عن طبيعة الأرض تحت مياه البحر والتى تمثل أكثر من 70 فى المائة من المساحة الكلية لسطحها مع أنها المفتاح لفك أسرار كوكبنا الغامضة. وربما كانت مغناطيسية الصخور، وهى مجال جديد نسبيا، الدافع الذى حرّك من جديد قضية إنجراف القارات.

فقد عكف العاملون الأوائل فى مجال مغناطيسية الصخور على البحث فى التغيّرات القديمة لمجال الأرض المغناطيسى وذلك لتفهم أعمق لطبيعة مجالها الحالى. فكل من استعمل البوصلة يعلم أن لمجال الأرض المغناطيسى قطب شمالى وآخر جنوبى. ويقع هذين القطبين المغناطيسيين بالقرب من نظائرهما الجغرافيين ولكن لا ينطبق أى منهما على الآخر. ويشبه مجال الأرض المغناطيسى المجال الذى يتكون حول قضيب ممغنط بسيط حيث تمر خطوط القوة الغير مرئية من خلال الكرة الأرضية ممتدة من قطب الى آخر (شكل 16



شكل 16 ـ 9
خط حركة القطب الظاهرية لأمريكا الشمالية وأوروبا. اذا ما اعيد تركيب هاتين الكتلتين القاريتين وقفل شمال الأطلسى فإن هذين المسارين ينطبقان على بعضهما.

تصبح الابرة أفقية عند ذلك الخط وعليه فإنه من الممكن تحديد الموقع نسبة الى خط الاستواء وذلك من قيمة الميلان وبالمثل فإن وضع المغناطيسية القديمة فى الصخور يدل على خط العرض الذى تمغنط فيه الصخر.

وقد أدت دراسة فى الخمسينات بأوروبا لعدة طفوح من اللابا من أعمار مختلفة الى اكتشاف مهم وهو أن ترتيب إتجاه المعادن الغنية بالحديد داخل هذه الطفوح يختلف إختلافا كبيرا بناء على اختلاف أعمارها. وقد أدى توقيع أماكن القطب المغناطيسى الشمالى على الخريطة نسبة للأزمنة المختلفة الى اكتشاف أنه تغير فى موقعه من منطقة بالقرب من هاواى تجاه الشمال عبر سيبيريا الى مكانه الحالى (شكل 16 ـ 9) خلال الخمسمائة مليون سنة الفائتة. وهذا دليل واضح على أن القطبين المغناطيسيين قد غيرا مواقعهما (**تحول القطبين**) عبر الأزمنة الغابرة أو أن القارات قد إنجرفت.

وبالرغم أنه من المعلوم أن القطبين المغناطيسيين يتحركان من موقعيهما غير أن الدراسات للمجال المغناطيسى تدل على أن معدل مواقع القطبين المغناطيسيين يقارب من مواقع القطبين الجغرافيين. وهذه النتيجة تتمشى ومعلوماتنا حول المجال المغناطيسى للأرض والذى تكوّن جزئيا من حركة الأرض حول محورها. واذا لم تتغير مواقع القطبين الجغرافيين وهو ما نعلم أنه يحصل فإنه لا يمكن للقطبين المغناطيسيين أن يتحركا. وعليه فإن التفسير الأكثر إحتمالا لظاهرة الحركة القطبية يكمن فى فرضية إنجراف القارات. فإذا ما بقى القطبان المغناطيسيان ثابتين فى مكانهما فإن حركتهما الظاهرية يمكن أن تنتج عن حركة القارات.

وقد دعّم الفكرة السابقة مقارنة موقع أوروبا الجغرافى نسبة الى خط الاستواء بواسطة الصخور الممغنطة، الى جانب الأدلة المستمدة من دراسات المناخ القديم. وقد أشارت بالذات ظاهرة إنتشار المستنقعات بمعظم أوروبا، والتى نتج عنها تراكمات الفحم، الى أن هذه القارة كانت أكثر قربا من خط الاستواء. وهذه حقيقة تناسب المناخ الاستوائى الذى تدل عليه رسوبيات الفحم المذكورة.

وقد برز دليل آخر لانجراف القارات عندما أعد منحنى بتحوّل القطبين لأمريكا الشمالية (شكل 16 ـ 9). وقد فوجىء الجميع بالشبه الواضح بين المسار القطبى لأمريكا الشمالية وأوروبا فيما عدى أنهما يفصل بينهما 30 درجة على خطوط الطول. فعندما تصلبت هذه الصخور فهل من المعقول أنه كان للأرض قطبين مغناطيسيين شماليين تحركا فى خطين متوازيين؟ هذا طبعا بعيد الاحتمال ولكن هذا الاختلاف فى مسارى هذه الهجرة القطبية يمكن تفسيره بإعادة تركيب القارتين بجانب بعضهما البعض كما نعتقد اليوم أنهما كانتا عليه وذلك قبل إنفتاح المحيط الأطلسى.

وبالرغم من أن هذه المعلومات قد أعادت الروح فى فكرة حركة القارات ولكنها لم تكن كافية لاحداث تغيّر ملحوظ فى الرأى العام العلمى. فالتقنية التى استعملت

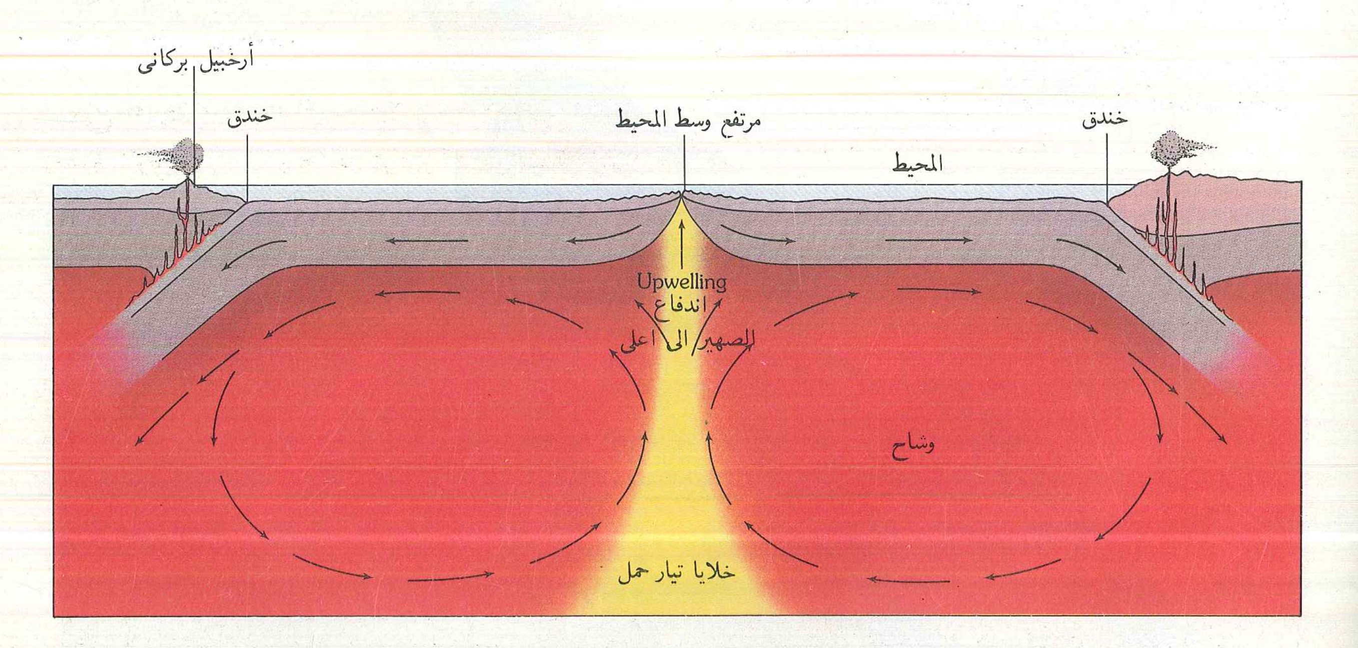
لاستخلاص معلومات المغناطيسية القديمة كانت حديثة العهد وغير موثوق بها الى جانب أن مغناطيسية الصخور تضعف بمرور الزمن. وللصخور قابلية أن تكتسب مغناطيسية ثانوية أيضا. وبالرغم من هذه المشاكل وغيرها من الأدلة المتضاربة فإن بعض الباحثين كانوا مقتنعين بحدوث الانجراف. وبدأ فجر جديد.

بداية ثورة علمية

لقد ساعد التطور التكنولوجى الكبير خلال الخمسينات والستينات من هذا القرن على التخريط الدقيق لقاع المحيط والذى بالتالى أدى الى اكتشاف سلاسل مرتفعات أواسط المحيطات. فقد وجد أن مرتفع وسط المحيط الأطلسى ذو اتجاهات موازية للحواف القارية على جانبى الأطلسى (شكل 1 ـ 11). ولقد كان أيضا بنفس الأهمية اكتشاف وادٍ صدعى يمتد على طول مرتفع وسط المحيط الأطلسى مما يدل على وجود قوة شد كبيرة فى المنطقة. وبالاضافة الى ذلك وجد أن منظومة مرتفع وسط المحيط يميزها دفق حرارى مرتفع وبعض النشاط البركانى. وفى نفس الوقت كانت هناك اكتشافات أخرى فى باقى قاع المحيط فقد دلّت الدراسات الزلزالية، بالقرب من بقاع الخنادق المحيطية العميقة، على وجود نشاط ما عند أعماق سحيقة تحت المحيط، كما أن المرتفعات المسطحة عند أعماق تبلغ مئات الأمتار تحت مستوى سطح البحر بها ما يدل على أنها كانت جزراً. هذا ولم يتمكن الباحثون من إلتقاط عينات من القشرة المحيطية يزيد عمرها على دهر الحياة المتوسطة. فهل من الممكن أن تكون قيعان المحيطات ظاهرة حديثة جيولوجياً؟

إنفراج قاع البحر

لقد جمع هارى هس من جامعة برنستون كل هذه

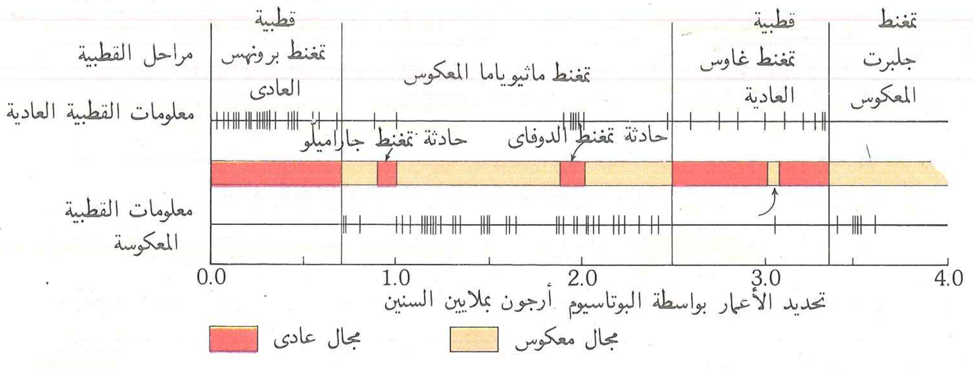


شكل 16 ـ 10

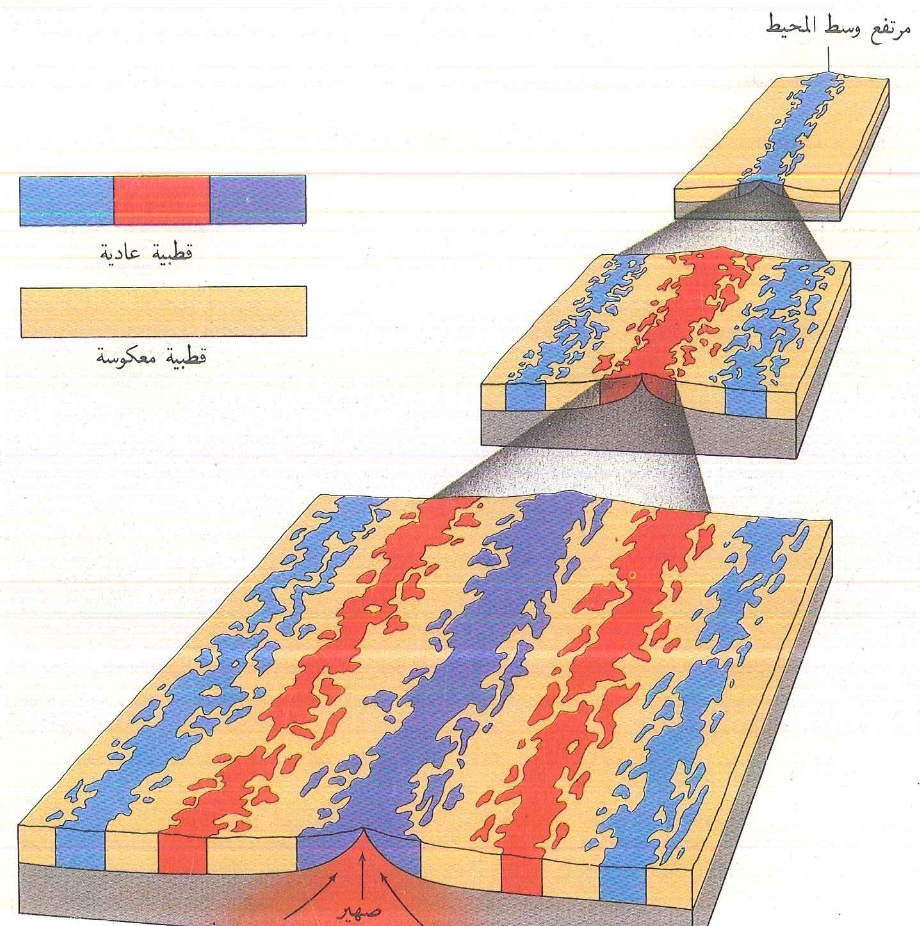
إنفراج قاع البحر. رأى هارى هس بأن ارتفاع الصهير على طول مرتفع وسط المحيط يكوّن قاع بحر جديد. ويحمل تيار الحمل قاع البحر مثل حزام التحويل الى خنادق أعماق البحر حيث يغور قاع البحر الى الوشاح.

الاكتشافات الجديدة فى أوائل الستينات فى فرضية عرفت فيما بعد بفرضية **انفراج قاع البحر**. ولقد كان ينقص هس المعلومات التى تعزز فكرته وعليه قام بتقديم مقالته على هيئة أحاسيس نحو الأرض. وقد اختلفت آراء هس هذه عن فرضية إنجراف القارات التى سبقتها والتى أهملت الأحواض المحيطية. وتركزت نظرية إنفراج قاع البحار على النشاطات التى لا تخضع للملاحظة المباشرة.

فقد كتب هس يقول بأن مرتفعات وسط المحيط تقع



شكل 16 ـ 11
مقياس زمنى للمعكوسات الرئيسية بالمغناطيسية فى الماضى القريب.



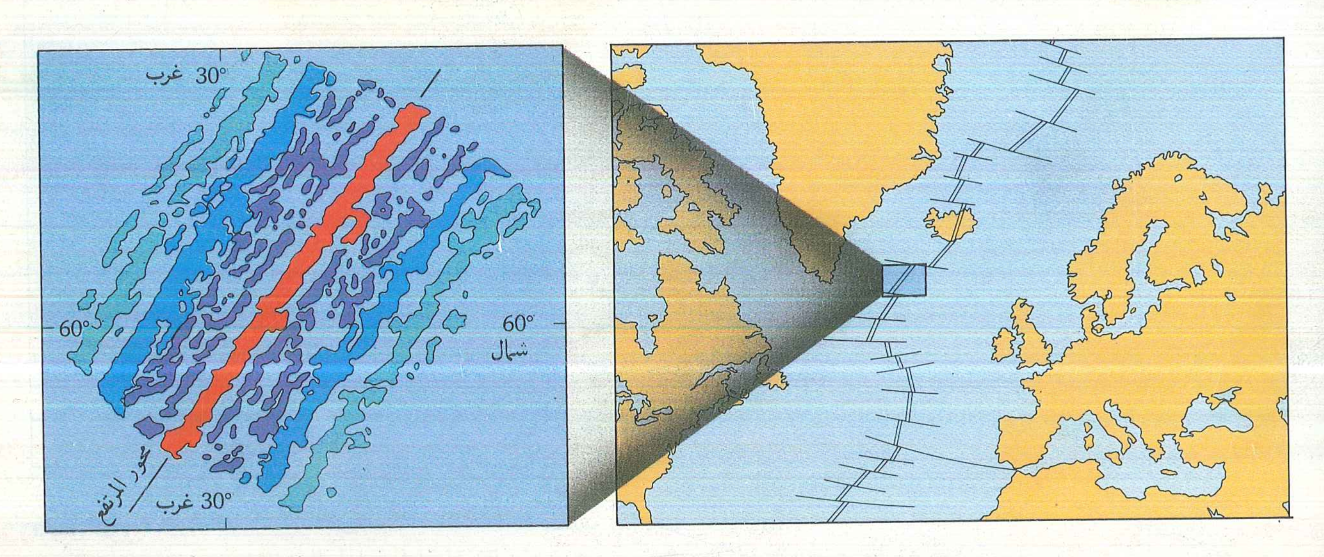
شكل 16 ـ 12
يسجل قاع البحر الجديد قطبية المجال المغناطيسى زمن تكوّنه. وحيث أن الصخور تعمل عمل المسجل فإنها تحفظ باستمرار التغيرات فى مجال الأرض المغناطيسى.

فوق الأجزاء الصاعدة من خلايا ضخمة من تيارات الحمل العاملة داخل الوشاح (شكل 16 ـ 10). وكلما انتشرت المواد الصاعدة من الوشاح جانبيا كلما أزيح قاع المحيط بعيدا عن قمة المرتفع فوق ما يشبه الحزام الناقل. وتعمل كذلك قوى الشد عند قمة المرتفع الناتجة عن التيارات المتباعدة جانبيا على فتح الطريق أمام الصهير ليقتحم مكونا قشرة محيطية جديدة. وبناء عليه كلما تحرك قاع المحيط بعيدا عن قمة المرتفع كلما حل محله قشرة محيطية جديدة. وقد قال هس أيضا بأن الأجزاء الهابطة من تيارات الحمل داخل الوشاح تقع تحت الخنادق البحرية. وبناء على ما قاله هس فإن الأجزاء القديمة من القشرة المحيطية عند الخنادق يتم استهلاكها تدريجيا داخل مكونات الوشاح. فقد قال فى ذلك أحد البحاث: لا غرو أن قاع المحيط حديث العمر فهو يتجدد باستمرار.

وبهذه الفرضية قد قام هارى هس بارساء دعائم مرحلة جديدة من الثورة العلمية. وقد جاءت الأدلّة المدعمة لآراءه بعد بضعة سنين وذلك من خلال عمل طالب دراسات عليا يدعى فرد فاين مع أستاذه د. ماتيوس، واللذان تكمن أهمية ما خلصا إليه فى أنهما ربطا بين فكرتين لم تكن بينهما علاقة فى السابق وهما: إنفراج قاع البحر وإنعكاس المغناطيسية الأرضية.

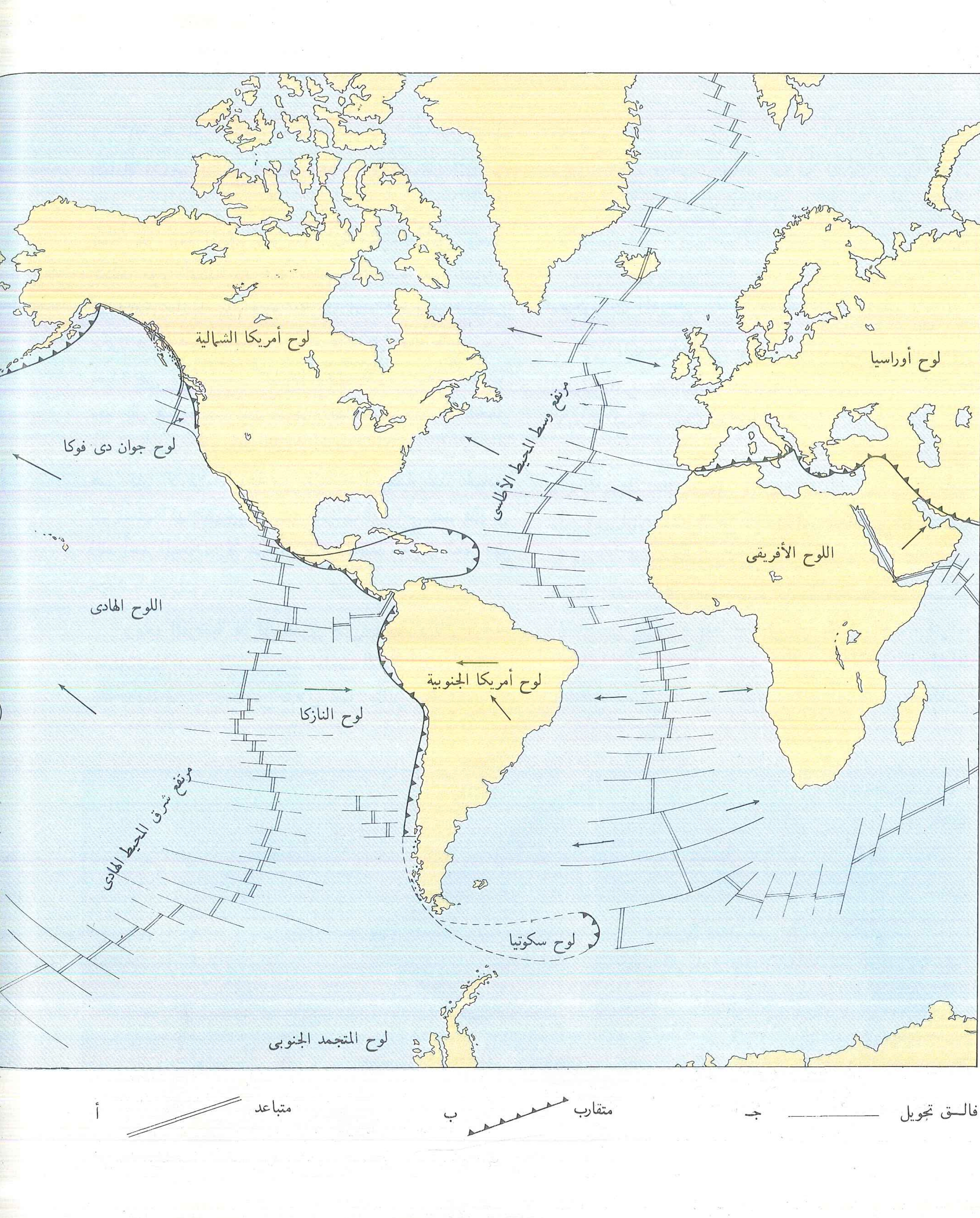
معكوسات المغناطيسية الأرضية

وفى الوقت الذى قام فيه هس ببلورة آراءه بدأ الجيوفيزيائيون فى القبول بالحقيقة التى تقول أن المغناطيسية الأرضية تعكس وضعية قطبيها دوريا أى أن القطب المغناطيسى الشمالى يصبح جنوبيا والعكس صحيح. ويعزى هذا الانعكاس الى التغير فى شدة المجال المغناطيسى. فقد دلّت الحسابات الحديثة الى أن المجال المغناطيسى قد ضعف بما مقداره 5 فى المائة خلال القرن المنفرط. فإذا ما استمر الحال عليه حوالى ألف سنة فإننا نتوقع أن المجال المغناطيسى يصبح ضعيفا جدا أو ربما يتلاشى. وأثناء فترات الضعف هذه ربما تتدخل بعض القوى الخارجية مثل نشاط كُلَف الشمس (البقع الشمسية) مساهمة فى إنعكاس



شكل 16 ـ 13

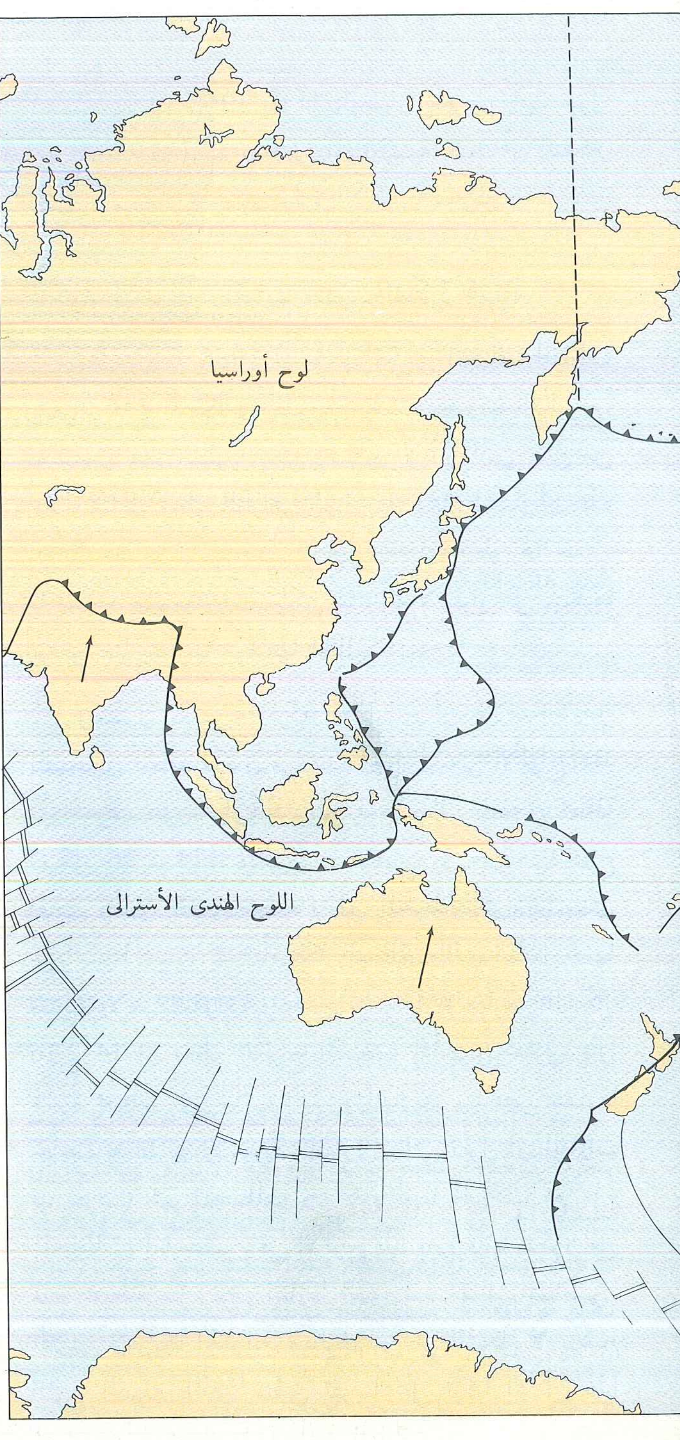
التماثل فى التغيرات المغناطيسية التى وجدت عبر مرتفع ريكاجانز جنوب غربى أيسلندة وتوضح الأشرطة الملونة نطاقات تمغنط اللابا فى الاتجاه العادى أما المساحة بين الألوان فتوضح التمغنط المعاكس.



لوح أمريكا الشمالية
لوح أوراسيا
لوح جوان دى فوكا
مرتفع وسط المحيط الأطلسى
اللوح الأفريقى
اللوح الهادى
لوح أمريكا الجنوبية
لوح النازكا
مرتفع شرق المحيط الهادى
لوح سكوتيا
لوح المتجمد الجنوبى
أ متباعد
ب متقارب
جـ فالـق تحويل

المغناطيسية الأرضية. وبعد عملية الانعكاس هذه يبنى المجال المغناطيسى نفسه من جديد فى وضعية عكسية. وبناء على هذه الوضعية الجديدة فإن الصخور المتكونة خلال هذه الفترة سيكون تمغنطها عكس الاتجاه لسابقتها. وعندما تحمل الصخور إتجاهاً مغناطيسياً مشابهاً للوضع الحالى يقال أن لها **قطبية عادية** أما الصخور ذات الاتجاه العكسى فيقال أن لها **معكوس القطبية** . ولقد أعيد ترتيب التاريخ القطبى لمجال الأرض المغناطيسى لعدة ملايين من السنين، وذلك باستعمال طريقة إشعاع البوتاسيوم ـ أرغون لتحديد الأعمار (شكل 16 ـ 11). ولقد وجد أن هناك علاقة مباشرة بين إنعكاس المغناطيسية وفرضية إنفراج قاع المحيط عندما جُرّت **أجهزة قياس المغناطيسية** بواسطة سفن الأبحاث عبر جزء من قاع المحيط مقابل الشاطىء الغربى للولايات المتحدة. وقد اكتشف بأن قاع المحيط مقلّم الى أشرطة ذات شدّة مغناطيسية عالية فى وضع متبادل مع أخرى فى شدّة مغناطيسية منخفضة ذات إتجاه شمال جنوب تقريبا. ولم يرد تفسير لهذه الظاهرة حتى سنة 1963 حين ربطها فاين وماثيوس بأفكار هس حول إنفراج قاع المحيط فقد رأى فاين وماتيوس أن الأجزاء ذات شدة مغناطيسية عالية هى مناطق من القشرة المحيطية بها مغناطيسية ذات قطبية عادية. وبالتالى فإن هذه الصخور ذات المغناطيسية الموجبة تزيد من قوة المجال المغناطيسى الحالى. أما الأجزاء ذات شدة مغناطيسية منخفضة فهى مناطق من القشرة المحيطية بها مغناطيسية قديمة ذات قطبية معكوسة، أى أنها تضعف من المجال المغناطيسى الحالى. ولكن كيف إنتظمت هذه الأشرطة المتوازية من الصخور ذات القطبية العادية والمعكوسة عبر قاع المحيط؟

ولقد أرجع فاين وماثيوس ذلك الى أنه عند تكوّن البازلت الجديد بقمة المرتفعات المحيطية فإنه يتمغنط بناء على المجال المغناطيسى لذلك الوقت. وحيث أن صخور جديدة تضاف بكميات متساوية تقريبا على حافتى المحيط المنفرجتين فإننا نتوقع تكوّن أشرطة صخرية متساوية الحجم



شكل 16 ـ 14
فسيفساء الألواح الصلبة التى تكوّن قشرة الأرض الخارجية. (أ) ـ (أ) طرف متباعد. (ب) طرف متقارب. (جـ) طرف فوالق التحويل

والقطبية فى وضع موازى لجانبى المرتفع المحيطى (شكل 16 ـ 12). وقد كان هذا التفسير للأشرطة الصخرية المتبادلة من القطبية العادية والمعكوسة والتى تمثل وجهى مرآة عبر المرتفعات المحيطية، أقوى دليل قدم مدعما لفكرة إنفراج قاع المحيط.

وبعد مدة قصيرة قام فريق من المرصد الجيولوجى لجامعة كولومبيا بدراسة كانت نتائجها مدعمة لمقترح فاين وماثيوس. فقد وجد هؤلاء الباحثون من خلال جرّهم لأجهزة قياس مغناطيسية فوق جزء من مرتفع الريجانس جنوب أيسلانده أن التباين المغناطيسى متماثل حيث يمثل المرتفع قمة تلك المنظومة (شكل 16 ـ 13). وبحلول سنة 1968 وجد أن هذا التماثل موازٍ لمعظم المرتفعات المحيطية.

والآن بعد أن تم تعيين أعمار معظم المعكوسات المغناطيسية الحديثة أمكن أيضا تحديد معدل الانفراج بالمرتفعات المحيطية بدقة متناهية. فأشرطة قاع المحيط الهادى مثلا اكبر بكثير من نظائرها لنفس الفترة الزمنية بالمحيط الأطلسى. وهذا يعنى أن معدل الانفراج بمنتصف المحيط الهادى أسرع من معدل الانفراج بالمحيط الأطلسى. وعند استعمال الأعمار المطلقة لهذه الأحداث المغناطيسية فإننا نجد أن معدل الانفراج بمرتفع وسط شمال الأطلسى يبلغ 1 أو 2 سنتيمترا فى السنة (لاحظ أن كل جانب من المرتفع ينفرج بنفس المعدل). أما المعدل بجنوب المحيط الأطلسى فإنه أكبر بقليل من هذه القيمة. ويتراوح معدل الانفراج بمرتفع شرقى المحيط الهادى بين 3 و 8 سنتيمترات سنويا، وبمعدل أقصى يبلغ 10 سنتيمترات فى السنة فى جزء منه. وعليه فإن فاين وماثيوس لم يكتشفا شريطاً مسجلاً لتفاصيل التغيرات المغناطيسية لمجال الأرض فحسب، ولكن أمكن استعمال هذا التسجيل أيضاً لتقدير معدل إنفراج قاع المحيط.

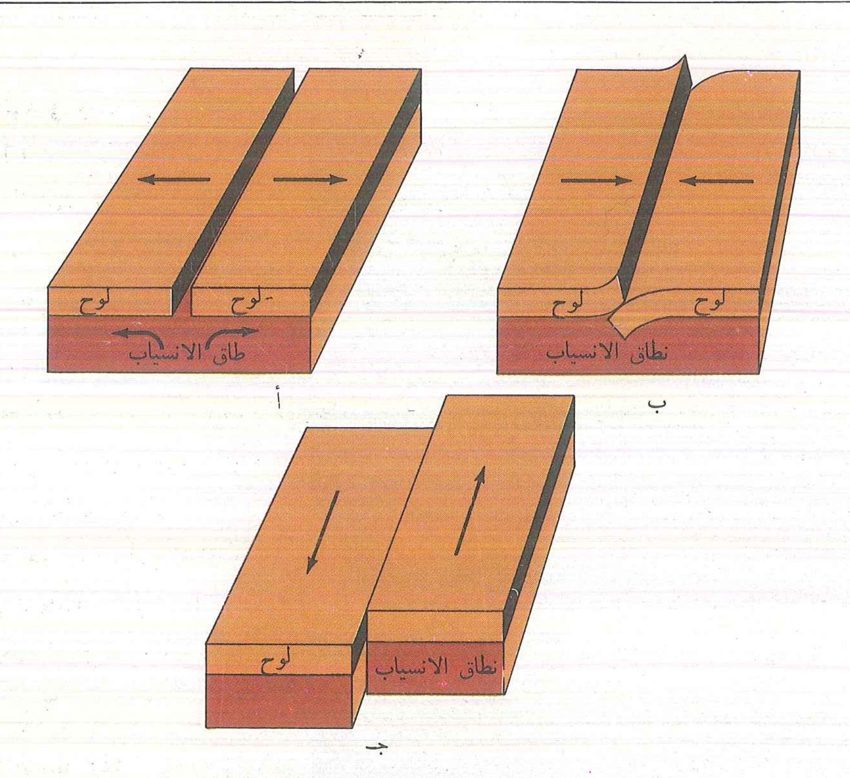
وهناك إتفاق عام الآن على أن المغناطيسية القديمة تعتبر أكثر الأدلة إقناعا لفكرتى إنجراف القارات وإنفراج قاع المحيط. وفى سنة 1968 بدأ الجيولوجيون يغيرّون رأيهم حول هذه القضية فيما يشبه معكوس المغناطيسية حيث أن التفكير العلمى أصبح الى جانب فكرة الأرض المتحركة.

حركية الألواح: تقديم جديد لفكرة قديمة

بحلول سنة 1968 تم توحيد فكرتى إنجراف القارات وإنفراج قاع المحيط فى نظرية عرفت بحركية الألواح. فمضمون هذه النظرية يمكن إعتباره الاطار الذى يمكن من خلاله تناول معظم الظواهر الجيولوجية. وعلى اعتبار أن هذه الفكرة جديدة نسبيا فمن البديهى تعديلها وتطويرها حسب ما يستجد من معلومات. ولكن يبدو أنه لا غبار على جوهرها وسنقوم هنا بتقديمها بوضعها الحالى.

وتقول نظرية حركية الألواح أن غلاف الأرض الصخرى الجامد مكوّن من عدّة أجزاء تسمى **الألواح**. وقد تمَّ التعرف على حوالى عشرين لوحا وذلك بأحجام مختلفة (شكل 16 ـ 14). واكبر هذه الألواح ما يعرف باللوح الهادى والذى يقع فى معظمه داخل المحيط الهادى، فيما عدى جزء بسيط حيث يقع بأمريكا الشمالية والذى يشمل منها جنوب ولاية كاليفورنيا وشبه جزيرة باها. لاحظ من الشكل 16 ـ 14 أن معظم الألواح الضخمة الأخرى تحتوى على قشرة محيطية الى جانب القشرة القارية. ويناقض هذا ما جاءت به نظرية الانجراف القارى والتى تقول أن القارات قد تحركت عبر المحيطات ولم تقل أنها تحركت مع قاع المحيطات. أما معظم باقى الألواح الصغيرة فإنها تتكون من مادة محيطية مثل لوح النازكا الذى يقع مقابل الشاطىء الغربى لأمريكا الجنوبية. وبالرغم من أن الشكل لا يوضح اللوح الصغير الذى ينطبق تقريبا على تركيا إلا أن هذا اللوح يقع فى مجمله داخل أحد القارات.

ويقع الغلاف الصخرى للأرض فوق النطاق الوهن، وهو جزء مكوّن من مادة لدنة ذات درجة حرارة عالية، وعليه فإن الألواح بالغلاف الصخرى مدعومة من تحتها بمادة لدنة



شكل 16 ـ 15
رسم تخطيطي لأطراف الألواح.
(أ) ـ طرف إنفراجي.
(ب) ـ طرف تتارب.
(جـ) ـ طرف فوالق التحويل.

بالنطاق الوهن. ويبدو أن هناك علاقة بين سمك ألواح الغلاف الصخرى وطبيعة مادة القشرة الأرضية التى تعلوها. وعموما فإن الألواح أقل سمكا تحت المحيطات حيث يتراوح سمك الألواح المحيطية بين 80 و 100 كيلومترٍ فى الوقت الذى تزيد فيه الألواح القارية على 100 كيلومترٍ وقد تبلغ الأربعمائة كيلومترٍ فى بعض المناطق.

ومن أحد معتقدات نظرية حركية الألواح أن كل لوح يتحرك كوحدة مستقلة نسبة الى بقية الألواح. ويعتقد أن السلوك الحركى للصخور داخل النطاق الوهن يسمح بحركة الألواح بقشرة الأرض الخارجية الصلبة. ومع حركة الألواح تبقى المسافة بين منطقتين أو مدينتين ثابتة وذلك على نفس اللوح بينما تتغير هذه المسافة باستمرار إذا كانت هاتين النقطتين تقعان على لوحين مختلفين. وحيث أن كل لوح من هذه الألواح يتحرك كوحدة مستقلة فإن معظم آثار هذه الحركة تقع عند حواف الألواح، وعليه فإن معظم النشاط الاهتزازى للأرض والتبركن وعملية بناء الجبال تقع على طول حواف الألواح.

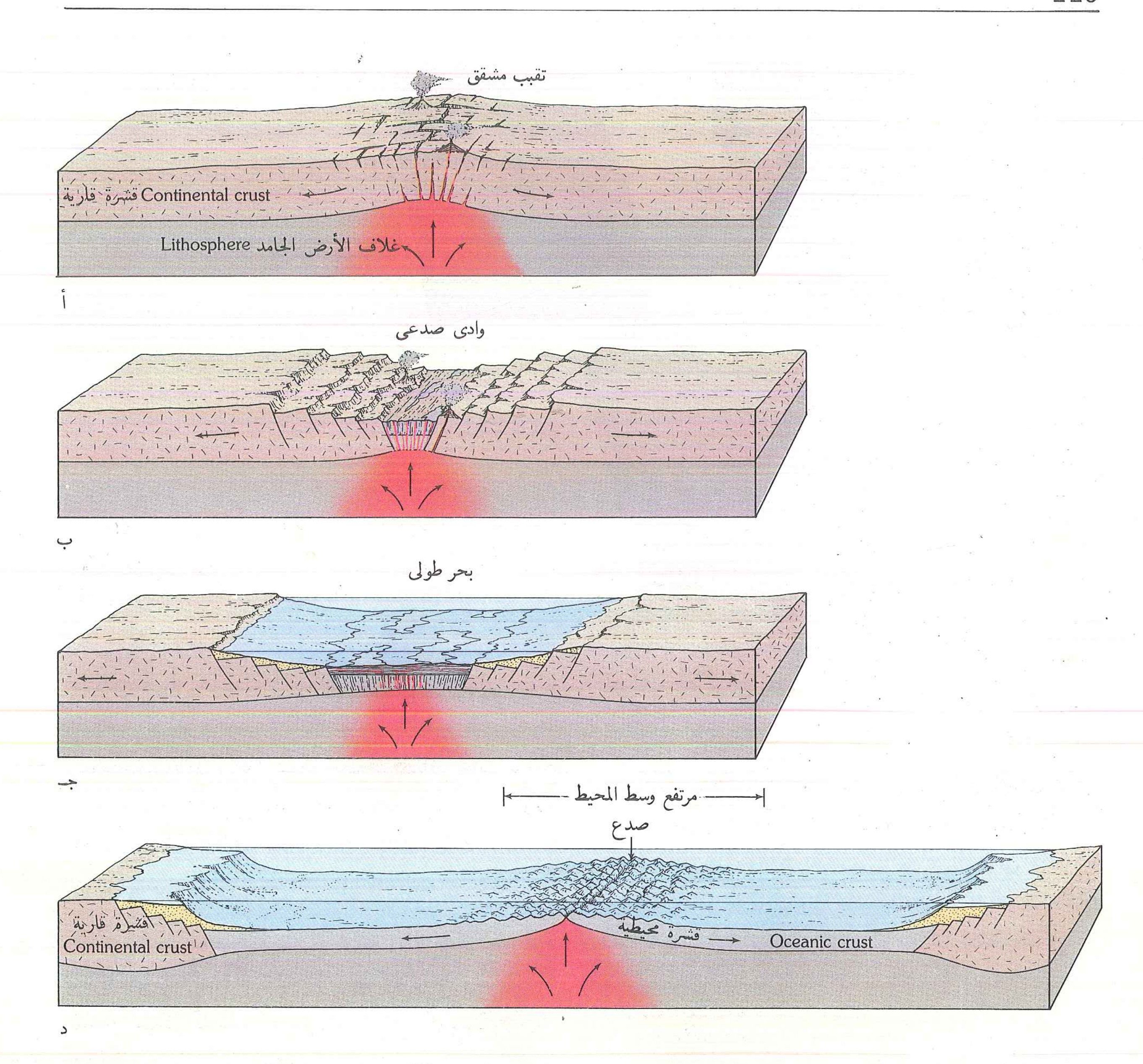
حواف الألواح

لقد عرفت النشاطات الحركية أو التكتونية للأرض لمدة من الزمن بنطاقات ضيقة ومحددة مثل التى تسمى بحلقة النار والتى تحيط بالمحيط الهادى. وبناء على ذلك فقد اعتمد فى البداية على توزيع الزلازل والنشاط البركانى فى تحديد مواقع حواف الألواح. وقد تبين فيما بعد أن هناك ثلاثة أنماط من حواف الألواح يتميز كل منها بحركة مختلفة (شكل 16 ـ 15) وهى:

1 ـ **حواف متباعدة** حيث تتحرك الألواح بعيدا عن بعضها، مما ينجم عنه خروج مواد من الوشاح لتكوّن قاعاً بحرياً جديداً.

2 ـ **حواف متقاربة** حيث تتحرك الألواح تجاه بعضها مما ينتج عنه إستيعاب جزء من الغلاف الصخرى داخل الوشاح باستمرار وذلك أثناء إنحدارها تحت اللوح المجتاز.

3 ـ **حواف فوالق التحويل** حيث تنزلق الألواح قبالة



شكل 16 ـ 16

(أ) ـ ارتفاع الصهير الى اعلى يسبب فى عدة تشققات فى الغلاف الجامد. (ب) ـ مع شد القشرة بعيدا عن بعضها تغوص مسطحات كبيرة من الصخور مكونة نطاقا صدعيا. (جـ) ـ المزيد من الانفراج يكوّن بحرا ضيقا. (د) ـ فى النهاية يتكون محيط ومرتفع بوسطه.

بعضها البعض دون إستحداثها أو تحطيمها للغلاف الصخرى.

وسنتعرض فى المقاطع التالية الى طبيعة هذه الحواف الثلاثة باختصار. وسنتناول فى الفصلين التاليين دور هذه الحواف فى إنفراج قاع البحر وبناء الجبال وذلك بتفصيل أكثر.

الحواف المتباعدة

تقع الحواف المتباعدة وهى مواقع إنفراج قاع البحر عند قمم مرتفعات وسط المحيط ويقوم هنا صهير الصخور المتصاعد من النطاق الوهن الساخن بملء الفراغ الناجم عن تباعد الألواح عن محور المرتفع. وتبرد هذه المادة ببطء مكونة جزءاً جديداً من قاع البحر. وتستمر عملية التباعد وحقن الصهير لتضيف الى القشرة المحيطية (الغلاف الصخرى) أجزاء جديدة. وكما سبق وأن أشرنا الى أن هذه الميكانيكية تسمى إنفراج قاع البحر وهى التى كونت قاع المحيط الأطلسى خلال 160 مليون سنة مضت.

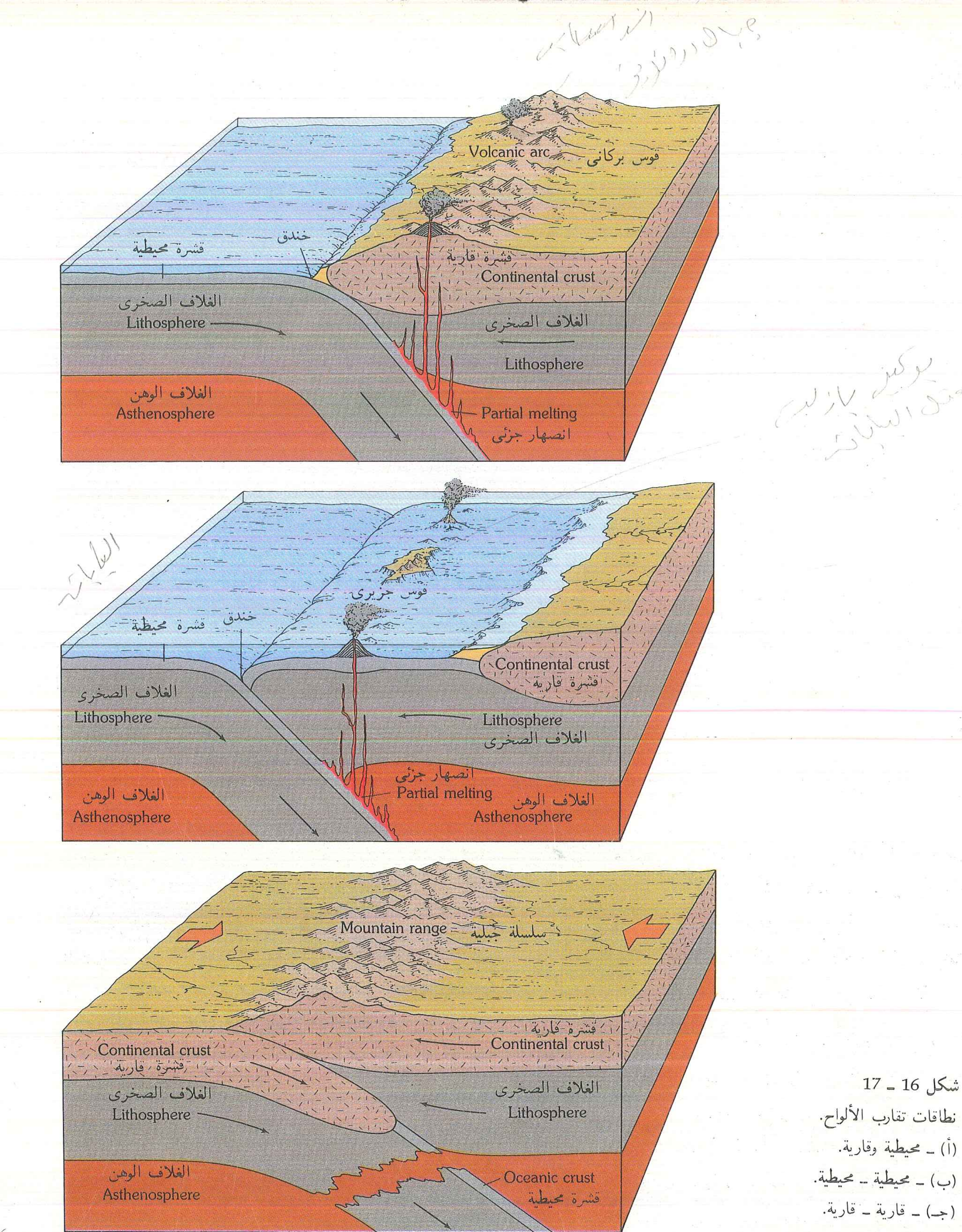
وليست كل مراكز الانفراج بقدم مرتفع وسط المحيط الأطلسى. ولا توجد جميعها بمنتصف محيطات واسعة. فيعتقد بأن البحر الأحمر مثلا هو موقع لحواف متباعدة تكوّنت حديثا حيث إنفصلت شبه الجزيرة العربية عن أفريقيا وبدأت فى الحركة تجاه الشمال الشرقى. وبناء عليه قد يعطى البحر الأحمر للمتخصصين فى علوم البحار فكرة عما كان عليه المحيط الأطلسى بداية تكوينه. وهناك نتيجة أخرى ملموسة لانفراج قاع البحر وذلك خلال الزمن الجيولوجى الحديث، ألا وهى خليج كاليفورنيا.

وعند تكوّن مركز إنفراج داخل أحد القارات فقد يتسبب فى إنشطارها الى أجزاء صغيرة وذلك كما ذكر واغنر فى تصوره لانشطار البنجيا. ويعتقد أن انقسام قارة ما يبدأ بصعود صخور ساخنة من تحتها مما يجعل القشرة الأرضية تنثنى الى أعلى فوق ذلك الموقع. وتتكون عدة شقوق شد كرد فعل لتمدد القشرة عند تقببها، كما هو مبين بالشكل 16 ـ 16 أ. وبانتشار المواد الساخنة المرتفعة جانبيا نسبة الى موقع صعودها تبدأ عملية شد أجزاء الغلاف الصخرى بعيدا عن بعضها. وبالتدريج تنزلق الأجزاء المكسورة وتغوص فى الفراغات التى أحدثتها الألواح المتباعدة (شكل 16 ـ 16 ب). وتسمى وديان المنخفضات الضخمة المتكونة نتيجة للتصدع أثناء هذه العملية بوديان الصدوع. ويعتبر الوادى الصدعى العظيم بشرقى أفريقيا مثال جيد لمثل هذه الظاهرة (شكل 17 ـ 20). واذا ما استمرت عملية الانفراج بشرقى أفريقيا، فإن هذا الوادى سيزداد فى طوله وعمقه حتى يصل الى المحيط وفى هذه الحالة يصبح الوادى بحرا ضيقا يفتح فى المحيط مشابها فى ذلك البحر الأحمر اليوم (شكل 16 ـ 16 جـ). وسيبقى نطاق التصدع موقعا للنشاط النارى ومصدرا مستمرا لأجزاء جديدة من قاع المحيط (شكل 16 ـ 16 د).

ويبدو أن الوادى الصدعى العظيم بشرق أفريقيا مرحلة بدائية لانشطار القارة (شكل 17 ـ 20). وتمثل الجبال البركانية الكبيرة، مثل جبل كيليمانجارو وجبل كينيا، النشاط البركانى الكبير الذى يعتقد أنه يصاحب مثل هذا الانشطار. واذا ما استمر الوادى الصدعى نشطا فإن شرقى أفريقيا سينفصل عن القارة كما حصل لشبه الجزيرة العربية منذ بضع ملايين من السنين. ولا تصل فى جميع الأحوال الوديان الصدعية الى مرحلة تكون فيها مركزا إنفراجيا. ففى وسط الولايات المتحدة مثلا يوجد نطاق صدعى خامل يمتد من بحيرة السوبيريور الى كانسس. وقد امتلأ هذا الوادى الذى كان نشطا فى السابق بالصخور المندفعة خلال القشرة الأرضية أكثر من 500 مليون سنة مضت. لماذا تبقى بعض الأودية الصدعية نشطة بينما تتوقف أخرى عن نشاطها؟ هذا ما لا نعلمه حتى الآن.

الحواف المتقاربة

تتكون وباستمرار عند مراكز الانفراج إضافات جديدة لغلاف الأرض الصخرى، وحيث أن مساحة سطح الأرض الكلية ثابتة لا تتغير فإن هذا الغلاف لا بد وأنه يستهلك بنفس المعدل. وقد وجد أن نطاق تقارب الألواح هو الموقع الذى يستهلك فيه غلاف الأرض الصخرى. فعند إرتطام لوحين تنثنى حافة أحدهما وتغوص تحت الأخرى. وعند دخول مقدمة اللوح الى النطاق الوهن الساخن ترتفع درجة حرارتها وتفقد تماسكها. وعادة ما يكون طرف اللوح الغائر



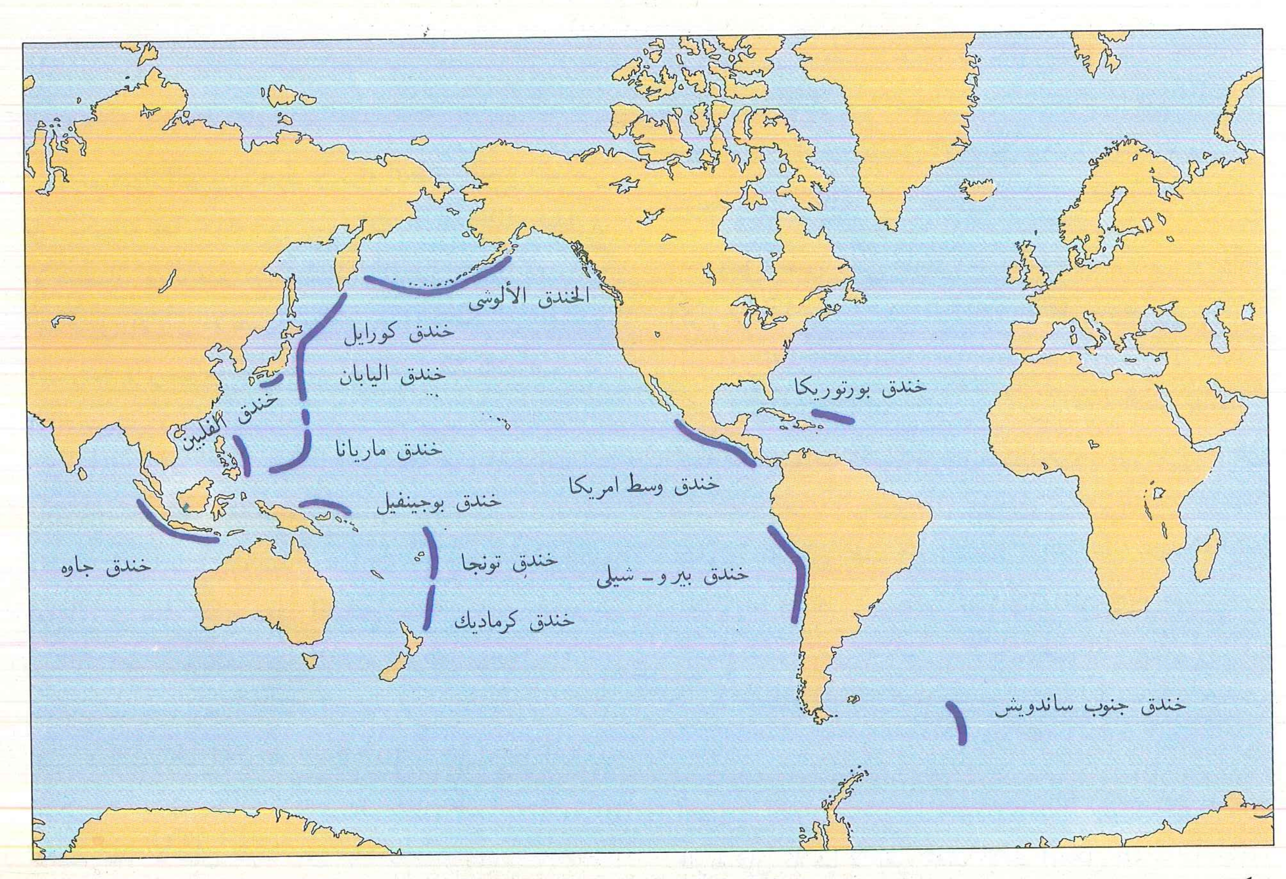
شكل 16 ـ 17

نطاقات تقارب الألواح.

(أ) ـ محيطية وقارية.

(ب) ـ محيطية ـ محيطية.

(جـ) ـ قارية ـ قارية.



شكل 16 ـ 18

توزيع خنادق العالم البحرية.

بارداً نسبة الى ما حوله داخل النطاق الوهن وبسمك يبلغ حوالى 100 كيلومترٍ أحيانا. وعليه فقد يصل هذا الجزء الغائر الى عمق 700 كيلومترٍ حسب زاوية الميل قبل أن يستوعب بالكامل داخل الوشاح العلوى.

وحيث أن جميع النطاقات المتقاربة متشابهة فى الأساس فإن طبيعة إرتطام الألواح تتأثر بنوعية مادة القشرة الأرضية. فقد يحدث الارتطام بين لوحين محيطيين أو لوح محيطى والآخر قارى أو بين لوحين قاريين كما هو موضح بالشكل 16 ـ 17. فكلما إلتقت حافة لوح تعلوه قشرة قارية بأخرى محيطية فإن المواد القارية الأقل كثافة تبقى دائما طافية بينما يغوص طرف القشرة المحيطية الأكثر كثافة فى النطاق الوهن. ويسمى الموقع الذى تغوص فيه الألواح المحيطية **بنطاق الغوص**. وبانزلاق اللوح المحيطى تحت اللوح الذى يعلوه ينثنى اللوح المحيطى مكونا **خندق أعماق البحار** وذلك بمحاذاة نطاق الغور (شكل 16 ـ 17 أ). وقد يبلغ طول الخنادق المكونة بهذه الطريقة آلاف الكيلومترات ويتراوح عمقها بين 8 و 11 كيلومترا (شكل 16 ـ 18.

التقارب المحيطى ـ القارى: عند إرتطام مسطح محيطى بكتلة قارية فإن القشرة المحيطية تنثنى وتغوص فى النطاق الوهن (شكل 16 ـ 17 أ). وأثناء نزول المسطح المحيطى تقوم الكتلة القارية من فوقها بكشط ما يعلوها من رسوبيات غير متماسكة. فقد دلّت الدراسات التى أجريت بالشواطىء الغربيّة للمكسيك موقع غوص طرف لوحة الكوكس بأن حوالى نصف الرسوبيات تتم إزالتها بهذه الوسيلة. وبناء

عليه نجد أن مثل هذه الظاهرة تضيف المزيد من الرسوبيات المتراكمة على طول القارة نتيجة لعوامل التعرية.

ومع هبوط اللوح المتحرك ودخوله النطاق الوهن الساخن فإن مكوناته وما يحمله من رسوبيات مشبعة بالماء تبدأ فى الانصهار. وبالرغم من أن هذه العملية غير مفهومة التفاصيل إلا أن الانصهار الجزئى لهذا الخليط من الصخور البازلتية والرسوبيات يعطى صهيرا مماثلا لصخور الأنديسيت أو الجرانيت أحيانا. وحيث أن الصهير الناتج يكون أقل كثافة من صخور الوشاح، فإن هذه المكونات تبدأ بالصعود تدريجيا حال تراكم كميات كافية منها. ومعظم الصهير الصاعد يبرد ويتبلّر عند أعماق تبلغ عدة كيلومترات. أما الباقى فقد يخرج على السطح لينتج عنه تفجرات بركانية أحيانا. ويعتقد أن الأجزاء البركانية بجبال الأنديز قد تكونت بهذه الطريقة عند إنصهار لوح النازكا أثناء نزوله تحت قارة أمريكا الجنوبية (شكل 16 ـ 14). وما الزلازل المتكررة الحدوث بجبال الأنديز إلا دليل على النشاط الذى يحدث عند الأعماق بعيدا عن أبصارنا.

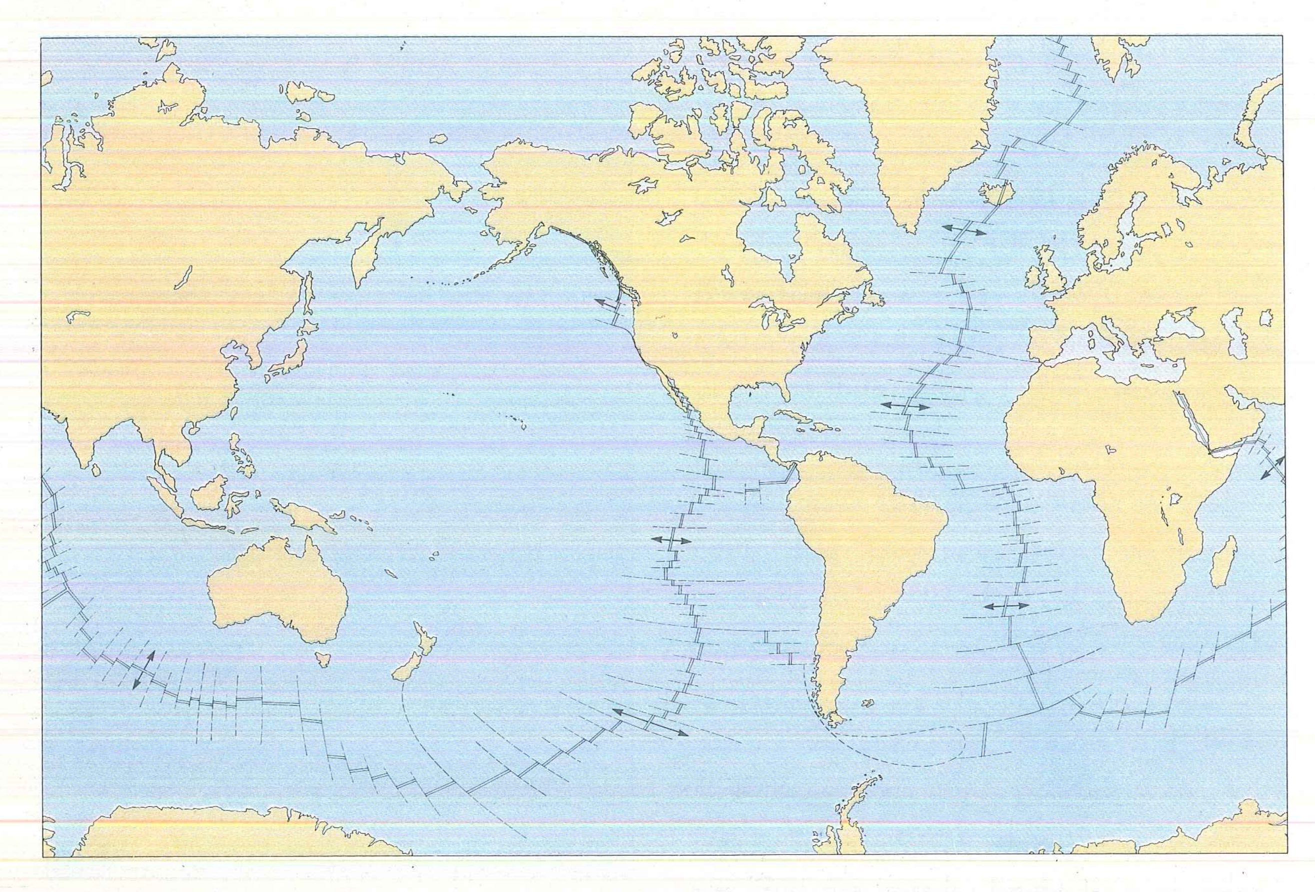
وتسمى الجبال التى يعتقد أنها تكونت جزئيا بنشاط بركانى مصاحب لنطاق الغور مثل جبال الأنديز **بالأقواس البركانية**. وتوجد مثل هذه الأقواس فى بقاع أخرى من العالم.

التقارب المحيطى ـ المحيطى: عند إرتطام مسطحين محيطيين يغوص طرف أحدهما تحت الآخر متسببا فى نشاط بركانى يشبه ذلك الذى يحدث عند إرتطام لوح محيطى بآخر قارى. غير أن مثل هذه البراكين تحدث فى قيعان المحيطات بدلا من حدوثها على اليابسة (شكل 16 ـ 17 ب). واذا ما إستمرت هذه النشاطات البركانية فإن كتلاً من اليابسة قد تبرز من أعماق المحيطات. وفى البداية تكون مثل هذه الظاهرة على هيئة سلسلة من الجزر البركانية تسمى **بقوس الجزر**. وجزر الأيلوشى والماريانا والتونجا مثال لذلك. وعادة ما تقع أقواس الجزر على بعد بضع مئات من الكيلومترات من خندق محيطى، حيث لا تزال عملية غور الغلاف الصخرى نشطة. ويلاحظ أن بمحاذاة أقواس الجزر المذكورة أعلاه يقع كل من خندق الأيلوشى وخندق الماريانا وخندق التونجا على التوالى.

وعلى مدى زمنى طويل من النشاط البركانى تتراكم أكوام بركانية هائلة على قاع المحيط مما يساعد مع طفوية الصخور النارية النابطة داخل القشرة الأرضية على زيادة حجم وارتفاع الأقواس المتكونة. ويزيد هذا النمو بالتالى كمية الرسوبيات المتراكمة بعوامل التعرية على قاع البحر. وقد تصل هذه الرسوبيات الخنادق البحرية مما يجعلها تتحول وتتشكل تحت قوة الضغط الناتجة عن جهد الألواح المتقاربة. وينتج عن هذه النشاطات المختلفة قوس جزر ناضج مكوّن من صخور بركانية مطوية ومتحولة وصخور نارية نابطة، ومثال ذلك شبه جزيرة ألاسكا والفلبين واليابان.

التقارب القارى ـ قارى: عند إرتطام لوحين يحملان قشرة قارية فإن كلاهما لا يغور تحت الآخر (شكل 16 ـ 17 جـ). ويعتقد أن ذلك ناتج عن خفة مكوناتها الصخرية الرسوبية وبالتالى طبيعة طفوتها. ويعتقد أن مثل هذه الظاهرة قد حدثت عند إرتطام قارة الهند التى كانت منفصلة بقارة آسيا مكونة جبال الهيمالايا التى ربما كانت أروع سلاسل العالم الجبلية جمالا. وأثناء هذا الارتطام إنثنت القشرة القارية وتشققت وقصرت فى طولها. والى جانب جبال الهيمالايا يعتقد أن العديد من السلاسل الجبلية الأخرى قد تكونت بارتطام الألواح القارية مثال الألب والأبالاش والأورال.

وقبل ارتطام القارات كانت الكتل القارية المعنية تفصل بينها قشرة محيطية تكوّنت أثناء فترة سابقة من الانفراج المحيطى. ومع تقارب الكتلتين القاريتين يغور قاع البحر الذى كان يفصل بينهما تحت أحد اللوحين. ويكوّن الانصهار الجزئى للمسطح المحيطى الغائر هذا مع الرسوبيات التى تعلوه قوس بركانى. ويحدد موقع نطاق الغور



شكل 16 ـ 19

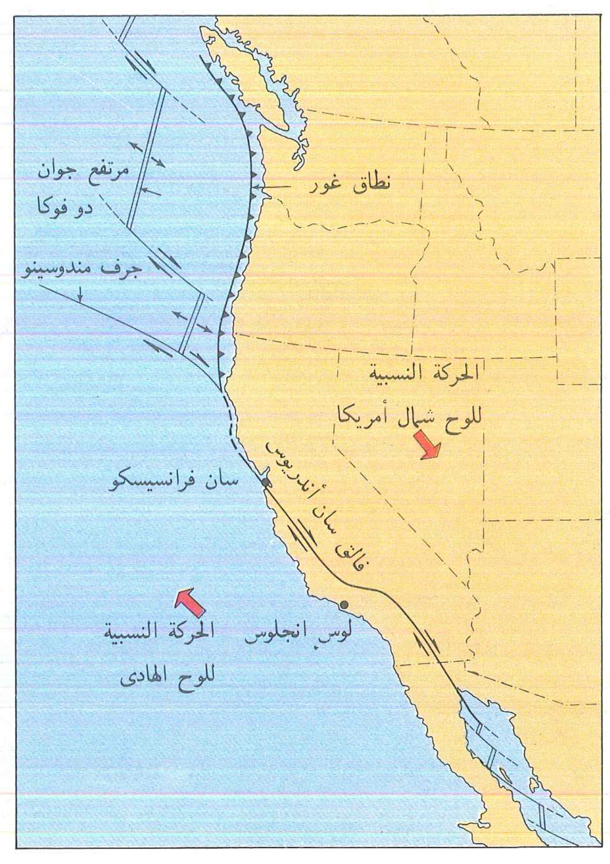
العلاقة بين مرتفعات وسط المحيط وفوالق التحويل. المواقع التى تعمل فيها فوالق التحويل على قطع استمرارية المرتفعات يتيسر للأخيرة تغيير اتجاهها (تتثنى) كما يتضح بالمحيط الأطلسى.

مكان إنبثاق القوس البركانى على أحد الكتلتين القاريتين. وإذا ما كان نطاق الغور على مسافة كافية داخل المحيط قد يتكون قوس جزر جديد. وعلى كل حال فإن تعرية القوس البركانى حديث التكوّن سيزيد كميات ضخمة من الرسوبيات على تلك المحمولة على الحواف القارية. ومع إنتهاء القشرة المحيطية التى تفصل القارتين ترتطم هاتان الكتلتان حيث تضغط على الرسوبيات بينهما لثنيها وتعيد تشكيلها كما لو أنها وضعت بين فكى مِلْزَمة ضخمة، مما ينتج عنه تكوّن سلسلة جبلية جديدة من الصخور الرسوبية المشكلة ومن أجزاء القوس البركانى.

وبعد ارتطام القارات يعتقد بأن المواد المحيطية الهابطة تنفصل عن الكتلة القارية مستمرة فى حركتها الى أسفل حتى تستوعب بكاملها داخل الوشاح، غير أن الغلاف الصخرى القارى تحت تأثير طفويته لا ينتقل بعيدا داخل الوشاح. ففى حالة الهيمالايا قد دُفِعَتْ مقدمة لوح الهند جزئيا تحت آسيا لتكوّن قشرة قارية سميكة، مما يُعْزَى اليه إرتفاع جبال الهيمالايا الشاهقة وهضبة التبت شمالا.

فوالق التحويل

والنوع الثالث من حواف الألواح هو فوالق التحويل التى تتواجد عند مواقع إنزلاق الألواح بمحاداة بعضها البعض دون تكوين قشرة جديدة كما هو الحال عليه عند

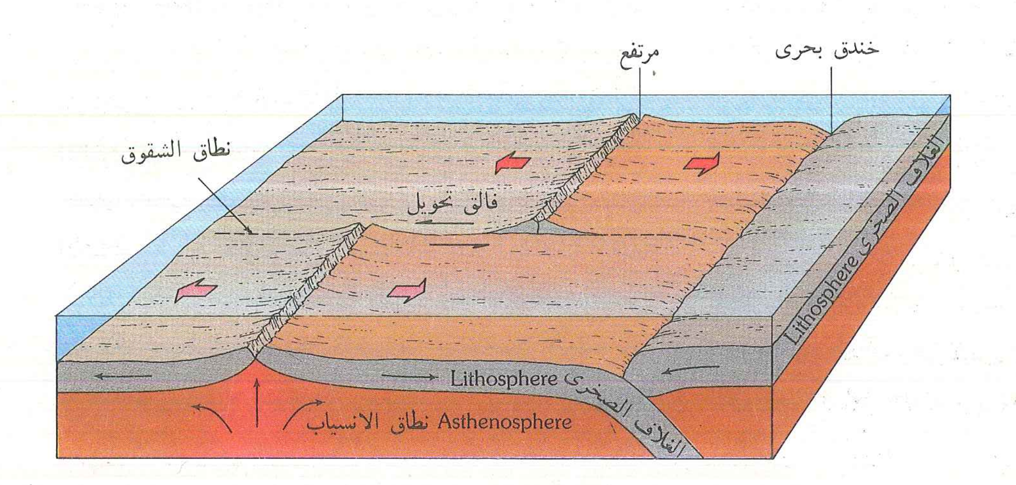


شكل 16 ـ 20

دور فوالق التحويل فى حركة الألواح النسبية. يسمح جرف مندوسينو بحركة قاع البحر الذى يتكون عند مرتفع جوان فوكا فى الاتجاه الجنوب شرقى متجاوزا اللوح الهادى.

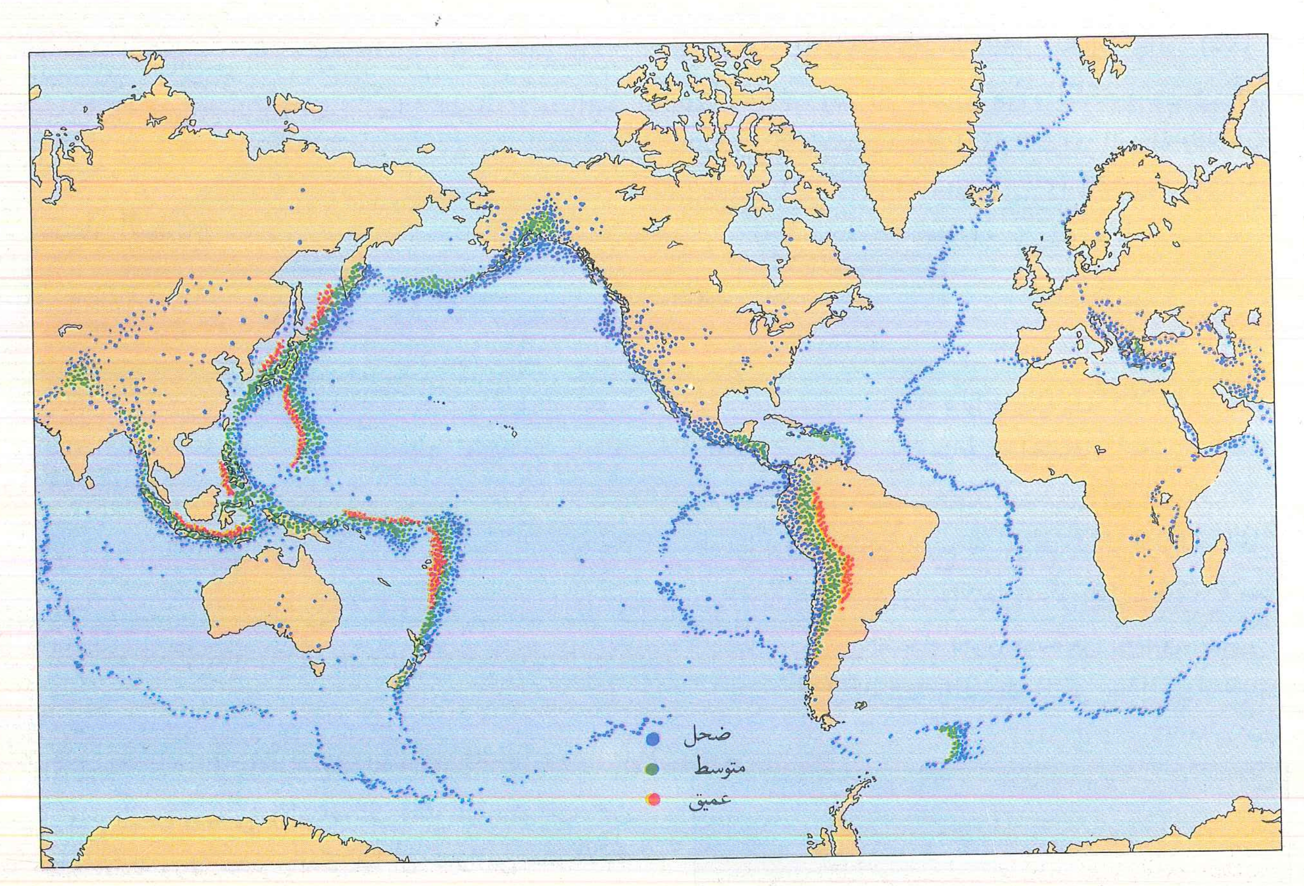
مرتفعات وسط المحيط ودون تحطم القشرة أيضا كما يحدث عند الخنادق البحرية. وتوازى فوالق التحويل تقريبا اتجاه حركة الألواح. وقد تم التعرف عليها فى البداية من تقاطعها لمرتفعات وسط المحيط (شكل 16 ـ 19). وتبدو هذه التشققات الضخمة من أول وهلة على أنها فوالق مضربية إنزلاقية بسيطة أثرت حركتها الأفقية فى تفاوت أجزاء مرتفعات وسط المحيط غير أن الحركة النسبية على طول نطاقات هذه الفوالق وجد أنها فى الاتجاه المعاكس لما يتطلبه هذا التفاوت.

وقد اكتشف ج. ولسون من جامعة تورونتو بكندا سنة 1965 الطبيعة الحقيقية لفوالق التحويل. فقد قال ولسون أن هذه التشققات الضخمة قد ربطت أحزمة الأرض النشطة بشبكة قسمت القشرة الأرضية الى عدة ألواح متماسكة. وعليه فقد كان ولسون أول من إقترح بأن الأرض مكونة من عدة ألواح وفى نفس الوقت تعرّف على نطاقات الحركة النسبية بين هذه الألواح. وبهذه الطريقة تكون فوالق التحويل هى الوسيلة التى تنتقل بها القشرة المحيطية من موقع تكونها بقمة المرتفعات المحيطية الى مواقع تحطمها بالخنادق البحرية كما هو موضح بالشكل 16 ـ 20. لاحظ أن لوح جوان دو فوكا يتحرك فى اتجاه الجنوب الغربى ليهبط تحت الشاطىء الغربى للولايات المتحدة. ويحد هذا اللوح



شكل 16 ـ 21

غالبا ما تصل الفوالق المحولة بين أجزاء المرتفعات المنفصلة. لاحظ أن الغلاف الصخرى يتحرك فى اتجاهين متعاكسين بين المرتفعين بينما يتحرك فى نفس الاتجاه فى المواقع الأخرى.



شكل 16 ـ 22

توزيع الزلازل: ضحلة ومتوسطة وعميقة المركز.

الصغير نسبيا من الجنوب واجهة مندوسينو الجبلية تحت البحرية. ويصل حد هذا الفالق مركز إنفراج نشط بنطاق غور. أى أن الفالق قد مكّن القشرة المتكونة عند قمة المرتفع من الحركة الى مثواها تحت قارة أمريكا الشمالية. لاحظ أنه فى الوقت الذى يتحرك فيه لوح جوان دو فوكا فى اتجاه الجنوب الشرقى فإن الحركة على طول فالق أو صدع سان أندرياس مكّنت اللوح الهادى من الانجراف تجاه الشمال الغربى بما فى ذلك جزء من كاليفورنيا.

وقد سمى ولسون هذه الفوالق بفوالق التحويل لأن الحركة النسبية للألواح يمكن أن تتغير أو تتحول على طولها. وكما رأينا من المثال السابق كيف أن التباعد عند قمة مركز الانفراج يمكن أن يتحول الى تقارب عند نطاق الغور. وحيث أن فوالق التحويل تربط الحواف المنفرجة بالحواف المتقاربة فى تركيبات متباينة فإن التغيرات الأخرى فى حركة الألواح النسبية يمكن أن تحدث على طول فوالق التحويل.

فكثير من الأحيان نجد أن فوالق التحويل تربط بين مرتفعين أو حتى أحيانا بين خندقين بحريين. فعندما تربط فوالق التحويل بين مركزى إنفراج كما هو مبين بالشكل 16 ـ 21، فإن قاع البحر الجديد يتحرك فى إتجاهين عكسيين وذلك فى المنطقة بين المرتفعين. وفى الأماكن الأخرى على طول هذا النطاق الصدعى نجد أن الحركة النسبية تتغير بحيث يتحرك اللوحان فى اتجاه واحد. وعليه فإن الجزء النشط

الوحيد من الفالق هو الذى يقع بين جزئى المرتفع المنفصلين. ويتميز هذا النطاق النشط أيضا ببعض الحركة الاهتزازية الضعيفة.

إختبار النموذج

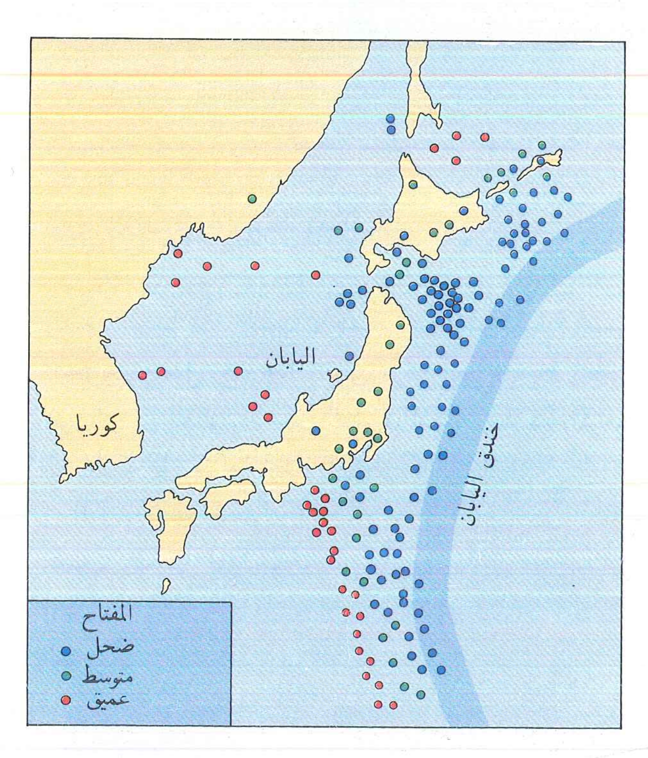
بعد إقتراح نظرية حركية الألواح مباشرة بُدِىءَ فى جمعَ قدر هائـل من البيانـات من فروع علـوم الأرض، وذلك لاختبار هذه الفكرة الجديدة. وبالتأكيد فإن النموذج الذى قدّم سيتم تعديله ليتناسب والمعلومات الوفيرة حول الموضوع، غير أنه يبدو أن أساس النظرية صحيح ولا غبار عليه وهو قادر على الثبات بمرور الزمن.

وبالرغم من أن معظم الجيولوجيين قد قبلوا بهذه النظرية بحماس إلا أن هناك رفض دائم للنظـرية برمتهـا أو على الأقل لجزء منها. ولقد تمّ التعرض فى هذا الفصل لبعض الأدلة المدعمة لنظريتى إنجراف القارات وإنفراج المحيطات أو قاع البحر، وسنأتى بالاضافة الى ذلك على ذكر المزيد من هذه الأدلة وربما جدير بالذكر هنا أن كثيراً من هذه الأدلة ليس بجديد بقدر ما هو إعادة لتحليل وتفهّم معلومات سابقة المعرفة. زد على أن بعض هذه المعلومات قد جمّعت أحيانا لدحض فكرة حركية الألواح وليس لدعمها. فقد قال أحد الباحثين: لا تتوافق ملاحظاتى على النيل من إنفراج قاع البحر غير أننى سأعد نقـدا كفيلا بأن يخلصنـا من هذه الفكرة الغريبة لنتفرغ فيما بعد لأعمالنا المعتادة. ولكن هذا الباحث، شأنه فى ذلك شأن الكثير من الآخرين. قد وجد أن نتائجه تنسجم ومفهوم هذه الفكرة وليس العكس. وعموما فقد كتب لهذه الثورة العلمية أن أخرجت نظرية سادت.

حركية الألواح والزلازل

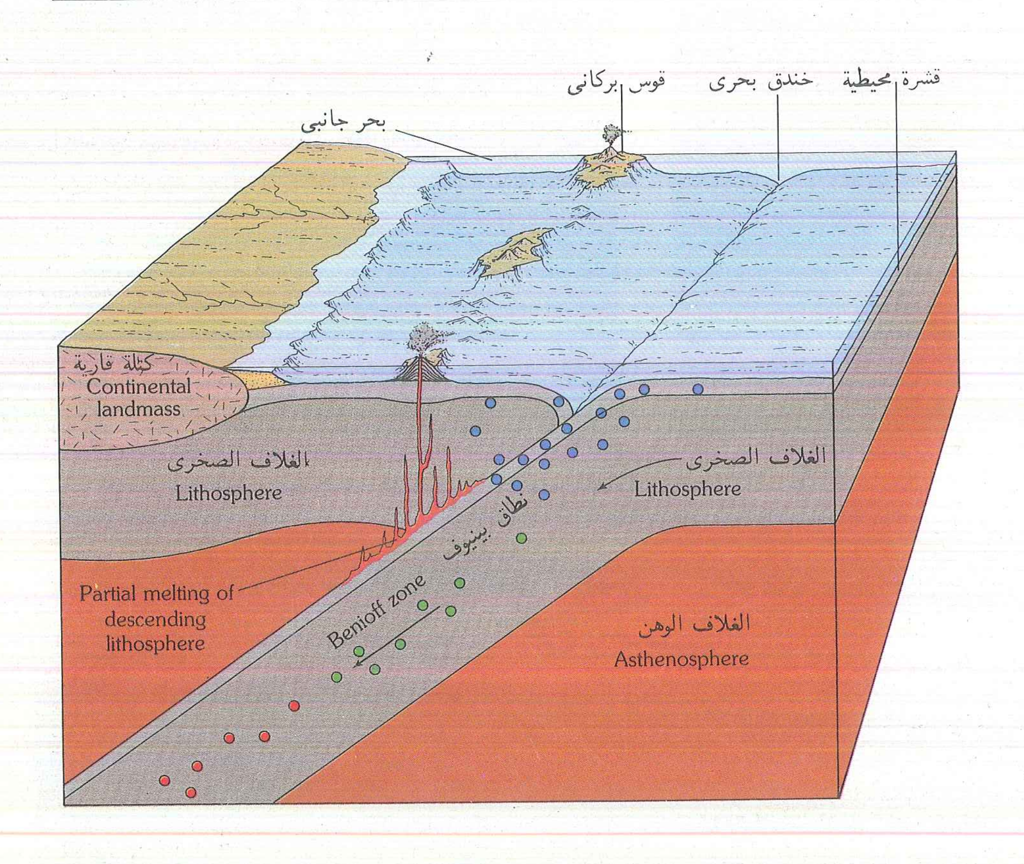
مع حلول سنـة 1968 ترسخـت الخطـوط العريضـة لأساس نظرية حركية الألواح. وفى نفس السنة نشر ثلاثة جيولوجيين من مرصد لامونت دورتى بحثا يوضح أن نموذج نظرية حركية الألواح الجديد أكثر فاعلية من النماذج السابقة فى تفسير كنه توزيع النشاط الزلزالى حول العالم، (شكل 16 ـ 22). وقد قام بالذات هؤلاء المتخصصون فى علم الزلازل بتفسير وجود الزلازل ذات المراكز العميقة وعلاقتها بالخنادق البحرية وأقواس البراكين، كما أن عدم وجود مثل هذه الزلازل على طول مرتفعات وسط المحيط ينسجم وهذا النموذج الجديد.

وقد سبق أن أوضحنا فى الفصل السابـق أن هنـاك علاقة مباشرة بين حواف الألواح والزلازل. ويلاحظ أن هذه العلاقة أكثر وضوحا فى مناطـق الخنـادق البحـرية حيث تغوص مسطحات من الغلاف الصخرى الى الوشاح. فقد وجد أن هناك تناسق واضح بين مواقع المراكز الزلزالية داخل الخنادق البحرية وأعماق مراكزها (شكل 16 ـ 23). لاحظ أن معظم الزلازل الضحلة تكون قريبة من الخنادق البحرية، بينما تقع الزلازل العميقة والمتوسطة المركز بعيدا عنها، حيث



شكل 16 ـ 23

توزيع مراكز الزلازل حول خندق اليابان البحرى.



شكل 16 ـ 24

العلاقة بين اللوح الهابط وعمق مراكز الزلازل.

تكون اكثر قربا من الأقواس البركانية. ولم يكن هناك تفسير مقنع قبل نموذج حركية الألواح لظاهرة توزيع البراكين المذكورة أعلاه.

وقد لاقى متخصصو الزلازل مشكلة أخرى تمثلت فى صعوبة تحديد ميكانيكية تكوين الزلازل العميقة المركز. تذكر أن تخزين طاقة التمغنط ومن ثمَّ إنطلاقها قد اعتمد وقتها كمصدر لطاقة الزلازل الضحلة المركز، غير أنه قد أثبت بأن درجة الحرارة والضغط عند أعماق تتراوح بين 60 و 100 كيلومترٍ تجعل الصخور تنساب تحت الاجهاد المرتفع، ولا تسلك مسلك الصخور الصلبة الهشة.

وقد أوضح زلزاليو مرصد لامونت ـ دورتى بأن جميع هذه الاستنتاجات تنسجم وما أتت به نظرية حركية الألواح. ففى نموذج الألواح تتكون الخنادق فى مواقع غوص المسطحات المحيطية داخل الوشاح. وترتفع درجة حرارة اللوح الغائر تدريجيا كلما زاد عمقه، غير أن درجة الحرارة داخل النطاق الذى يمر به تبقى منخفضة نسبيا حيث أن مواد باردة يتم وباستمرار اضافتها من أعلى. فقد وجد الباحثون أن مركز مسطح يبلغ سمكه حوالى 100 كيلومترٍ ويغور بمعدل بضع سنتيمترات سنويا سيبقى هشا حتى عمق 600 و 700 كيلومترٍ، أى أنه بالامكان حدوث زلازل ذات بؤر عميقة بطريقة مشابهة للزلازل الضحلة بانطلاق طاقة التمغط المخزنة داخل المسطح المتماسك، حيث تقابل مقاومة، لحركة غوصها الى أسفل.

وبغوص المسطح الى أعماق اكبر واكبر داخل النطاق الوهن تحدث الزلازل. وحيث أن هذه الزلازل تحدث داخل الغلاف الصخرى المتماسك بدلا من الجزء الوهن (اللدن)، عليه يمكن تتبعها ورصد حركة الألواح داخل الوشاح (شكل 16 ـ 24). فقد دلّت المعلومات الزلزالية بأن الألواح تبدأ فى

هبوطها بزاوية تبلغ حوالى 45° . تذكر أن هذه النطاقات من النشاط الزلزالى المائل والتى تمتد من الخنادق البحرية الى النطاق الوهن تسمى **نطاقات بينيوف**، وذلك على إسم العالم الزلزالى الذى قام بدراسات مستفيضة حول توزيع بؤر الزلازل. فقد وجد أن زلازل قليلة جدا يمكن أن تحدث تحت أعماق تزيد على 700 كيلومتر ربما لأن الغلاف الصخرى قد يستوعب بالكامل داخل الوشاح عند هذا العمق.

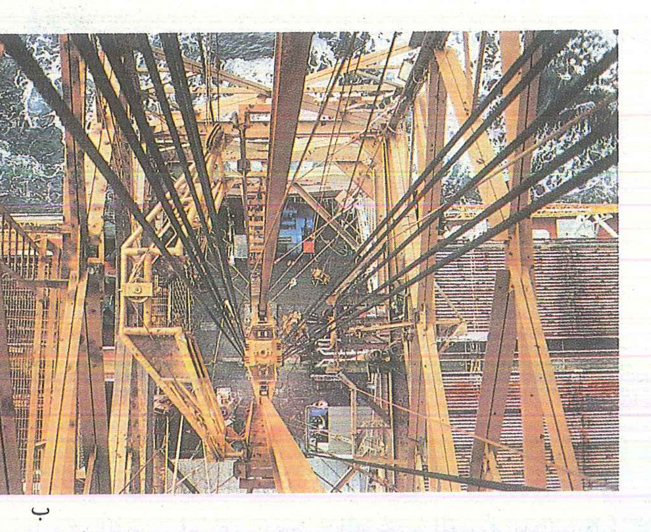
وفى الوقت الذى تحدث فيه الزلازل فى الألواح الغائرة فإن زلازل ضحلة أيضا تحدث فى الألواح التى تعلوها. ويعتقد بأن هذه الزلازل الضحلة تتكوّن بفعل الاجهاد الناتج عن مرور المسطحات الغائرة أسفل الألواح التى تعلوها.

ويفسر نموذج حركية الألواح أيضا غياب البراكين العميقة على طول مرتفعات وسط المحيط فبناء على هذا النموذج تقع النطاقات المتباعدة عند أمكنة تخرج عندها باستمرار مواد الوشاح الساخنة. وعليه فإن الطبقات العليا فقط تكون هشة بما فيه الكفاية لاحداث زلازل ضحلة البؤرة. وهذا يفسر ظاهرة حدوث الزلازل الضحلة فقط فى هذه المناطق.

أدلة من مشروع الحفر بأعماق البحار

لقد جاءت بعض الأدلة المدعمة لفكرة إنفراج قاع البحر من الحفر خلال رسوبيات قاع المحيط ومصدر هذه المعلومات جاء من مشروع الحفر بأعماق البحار الذى بدأ فى أواخر الستينات من هذا القرن تحت إشراف مشترك لعدة مؤسسات متخصصة. وقد كان الهدف الأول (ولا زال) هو جمع المعلومات المباشرة حول عمر وطبيعة تكوين الأحواض المحيطية. فقد شعر العلماء بأن التنبؤات المستمدة من معلومات المغناطيسية القديمة يمكن إثباتها فقط بجمع عينات من قيعان الأحواض المحيطية. ولتحقيق هذا الهدف بُنيت سفينة أبحاث جديدة أسموها المتحدى (شكل 16 ـ 25)، وهى حدث تقنى هائل حيث أنها قادرة على إنزال أنابيب الحفر الى عمق آلاف الأمتار من مياه المحيط، ثم الحفر مئات الأمتار خلال الرسوبيات وما تحتها من قشرة بازلتية. وقد جعل ذلك ممكنا تطوير ديناميكية تحديد الموقع والتى استعملت الموجات الصوتية من جهاز صوتى خاص يتم إنزاله الى قاع البحر. وأى تغير فى موقع السفينة يتم التنبه إليه بواسطة حاسوب يعمل على إستقبال الموجات الصوتية ثمَّ يتصرف ذاتيا لتصحيح ذلك عن طريق آلات دفع السفينة الجانبية أو الداسر عند أحد طرفيها. وبهذه الطريقة تستطيع هذه السفينة الثبات فوق نقطة الحفر لمدة طويلة حتى فى المياه العميقة جدا وتحت ظروف صعبة من التيارات والأمواج.

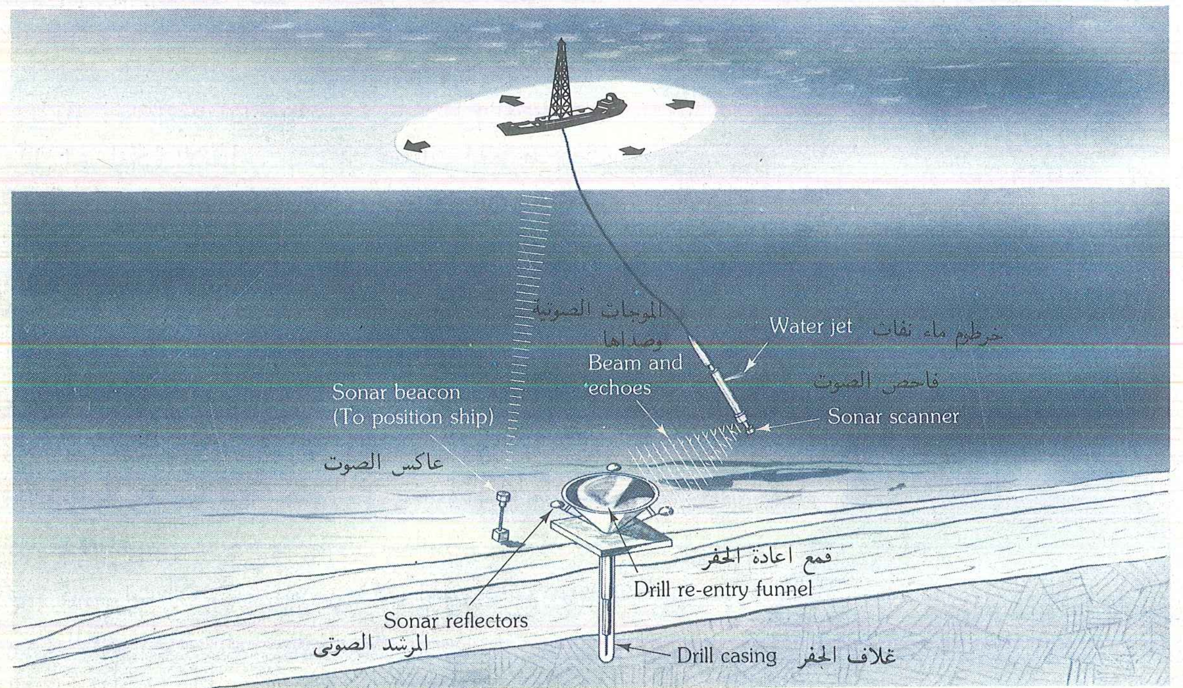
وقد بدأت مهمة هذه السفينة فى شهر أغسطس من سنة (1968) حيث أمكن بعدها بقليل الحصول على أدلّة من جنوب المحيط الأطلسى. فقد تم الحفر عند مواقع عدة خلال رسوبيات القاع حتى صخور القاعدة البازلتية. وقد كان هناك هدف مهم ألا وهو تجميع عينات من الرسوبيات فوق القشرة النارية مباشرة وذلك كأداة لتحديد عمر قاع البحر عند كل موقع (لا يعتمد على تقدير عمر القشرة المحيطية نفسها بواسطة المواد المشعة حيث أن البازلت تتأثر مكوناته تحت تأثير مياه البحر). وحيث أن عملية الترسيب قد بدأت بعد تكوّن القشرة المحيطية مباشرة فإن المستحاثات التى تجمع من أقدم الرسوبيات عمرا (التى توجد على قاع المحيط مباشرة فوق البازلت) يمكن أن تستعمل لتحديد عمر قاع المحيط بذلك الموقع. وعند توقيع أماكن الحفر نسبة الى بعدها عن مرتفع وسط المحيط وجد أن أعمار الرسوبيات تزداد بازدياد هذه المسافة. وبالطبع فإن هذه النتائج تنسجم وما جاءت به فكرة إنفراج قاع البحر والتى تنبأت بأن أحدث بقع المحيط لا بد وأن تكون عند قمة مرتفع وسط المحيط وأن أقدم أجزاء قاع المحيط بالمقابل تكون بمحاذاة حواف القارات. وبالاضافة الى ذلك فقد وجد أن معدل إنفراج قاع المحيط الذى تمَّ حسابه من المعلومات عن أعمار رسوبيات



ب



أ



جـ

شكل 16 ـ 25

(أ) ـ سفينة الأبحاث هذه مجهزة لالتقاط عينات من رسوبيات أعمق بقاع المحيطات. طولها حوالى 120 مترا وحمولتها 100,000 طن. (ب) ـ بوسط السفينة برج طوله 42 مترا. هذا منظر الى تحت من قرب قمة البرج حوالى 61 مترا فوق خط الماء. (جـ) ـ قدرة السفينة الهائلة. يمكن ايقاف السفينة فى اعماق هائلة دون مرساة والمحافظة عليها فى وضع الحفر طوال المدة اللازمة لذلك ويرجع ذلك الى أجهزة التحكم بالسفينة التى تحافظ عليها فى دائرة قطرها 100 متر، كما يمكن الرجوع واعادة الحفر فى موقع سابق اذا لزم الأمر. وربما يبدوذلك سهلا لكن تذكر ان قطر البئر لا يزيد على 12 سنتيمترا وهى على بعد قد يبلغ آلاف الأمتار تحت السفينة. وعند اعادة الدخول الى البئر يتم انزال خيط الحفر مع فاحص الصوت الذى يبعث باشارات صوتية ترجع اليه من ثلاثة عاكسات مثبتة فوق قمع. كل ذلك يرسل الى السفينة حيث يتم استعمال خرطوم مائى نفاث لتوجيه الثاقب فوق القمع مباشرة.

القاع ينطبق مع التى سبق وأن تمَّ تقديره من الدليل المغناطيسى. وقد دعم بالتالى الحفر فى المحيط الهادى هذه النتائج مما جعل هذه المضاهاة الجيدة حجة دامغة لظاهرة إنفراج قاع البحر.

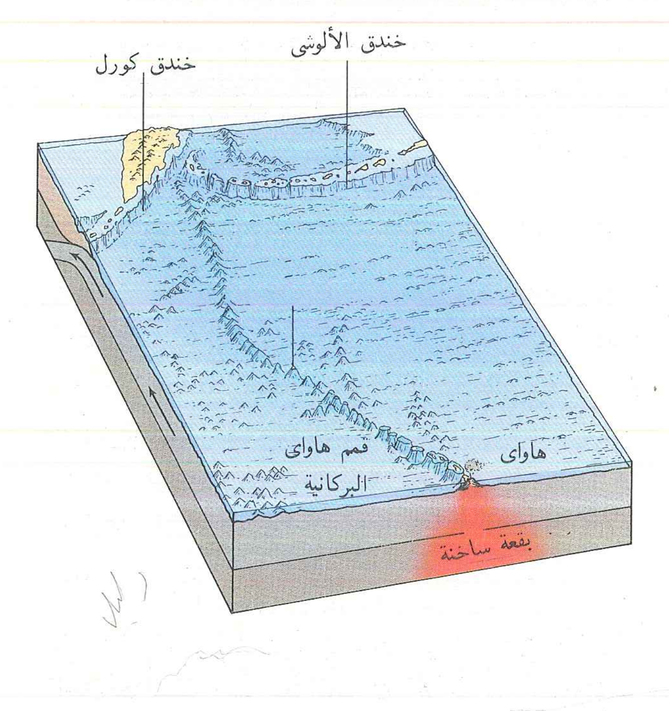
وقد دعّمت كذلك المعلومات المستقاة من مشروع الحفر بأعماق البحار الفكرة القائلة بأن الأحواض الترسيبية المحيطية حديثة العمر جيولوجيا. فلم يتم العثور حتى الوقت الحاضر على رسوبيات يزيد عمرها على 160 مليون سنة فى الوقت الذى يبلغ عمر بعض الصخور القارية حوالى 3.8 بليون سنة.

وقد وجد أيضا أن سمك رسوبيات قاع المحيط هى دليل آخر لفكرة الانفراج، حيث أن عمليات الحفر قد بينت أنه لا توجد تقريبا أية رسوبيات فوق قمم مرتفعات وسط المحيط بينما يزيد سمكها كلما ابتعدنا عن هذه المرتفعات. وحيث أن قمة مرتفع وسط المحيط هى أحدث من المواقع البعيدة عنه فإن هذا التوزيع للرسوبيات متوقع إذا ما صحت فكرة إنفراج قاع البحر. وبالاضافة الى ذلك فقد وجد من القياسات بعرض المحيط أن معدل تراكم الرسوبيات يبلغ حوالى 1 سنتيمتر كل 1000 سنة. وإذا ما كان قاع المحيط قديماً حقا فلا بد وأن سمك رسوبياته قد بلغ عدة كيلومترات الآن، غير أنه من خلال الحفر بمئات المواقع حتى الوقت الحاضر لم يتجاوز سمك الرسوبيات مئات الأمتار. إذاً هذا دليل آخر يؤكد بأن قاع المحيط ظاهرة حديثة جيولوجيا.

ولقد قدَّم مشروع الحفر بأعماق البحار للباحثين كميات هائلة من المعلومات الأساسية حول تاريخ المحيطات، كما أنه أكد الكثير من أوجه نظرية حركية الألواح. وباختصار لقد أُثْبِتَتْ نظرية إنفراج قاع البحر عندما بيَّنت عينات لب الآبار لقاع المحيط أن الرسوبيات أقدم عمرا وأكثر سمكا كلما ابتعدنا عن مرتفعات وسط المحيط، بالاضافة الى أن هذه المعلومات قد دعّمت وبقوة فكرة الحداثة الجيولوجية لأحواض المحيطات الترسيبية. وستعمل سفينة الأبحاث هذه فى السنوات القادمة أو ربما أخرى أحدث منها على تفهّم أوضح لأصل وتطور أحواض المحيطات.

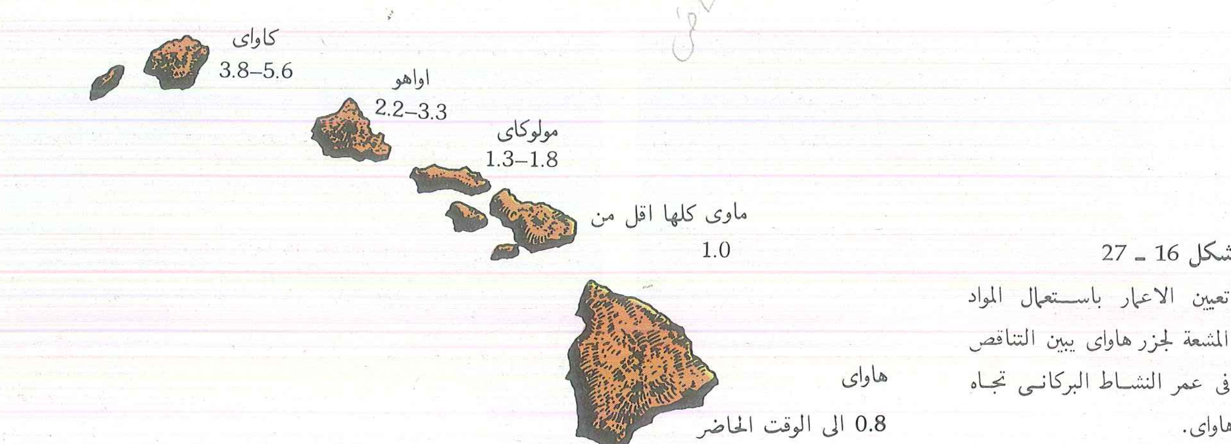
البقع الساخنة

لقد بينَّ تخريط القمم البركانية بالمحيط الهادى وجود سلسلة تركيبية بركانية تمتد من جزر هاواى الى جزيرة مدوى، ثم تستمر شمالا تجاه الخندق الأوليشى. وقد بينَّ تحديد العمر باستعمال البوتاسيوم ـ أرغون من 27 موقعا بركانيا على هذه السلسلة أن عمر الصخور يزيد بزيادة المسافة عن هاواى. فقد وجد أن عمر قمة سويكو البركانية ـ تقع بالقرب من خندق الأوليشى المحيطى ـ حوالى 65 مليون سنة بينما يبلغ عمر جزيرة مدوى حوالى 27 مليون سنة، بالاضافة الى أن جزيرة هاواى قد وجد أنها برزت من المحيط منذ أقل من مليون سنة مضت (شكل 16 ـ 26).



شكل 16 ـ 26

سلسلة من الجزر وقمم بركانية تمتد من هاواى الى الخندق الألوشى.



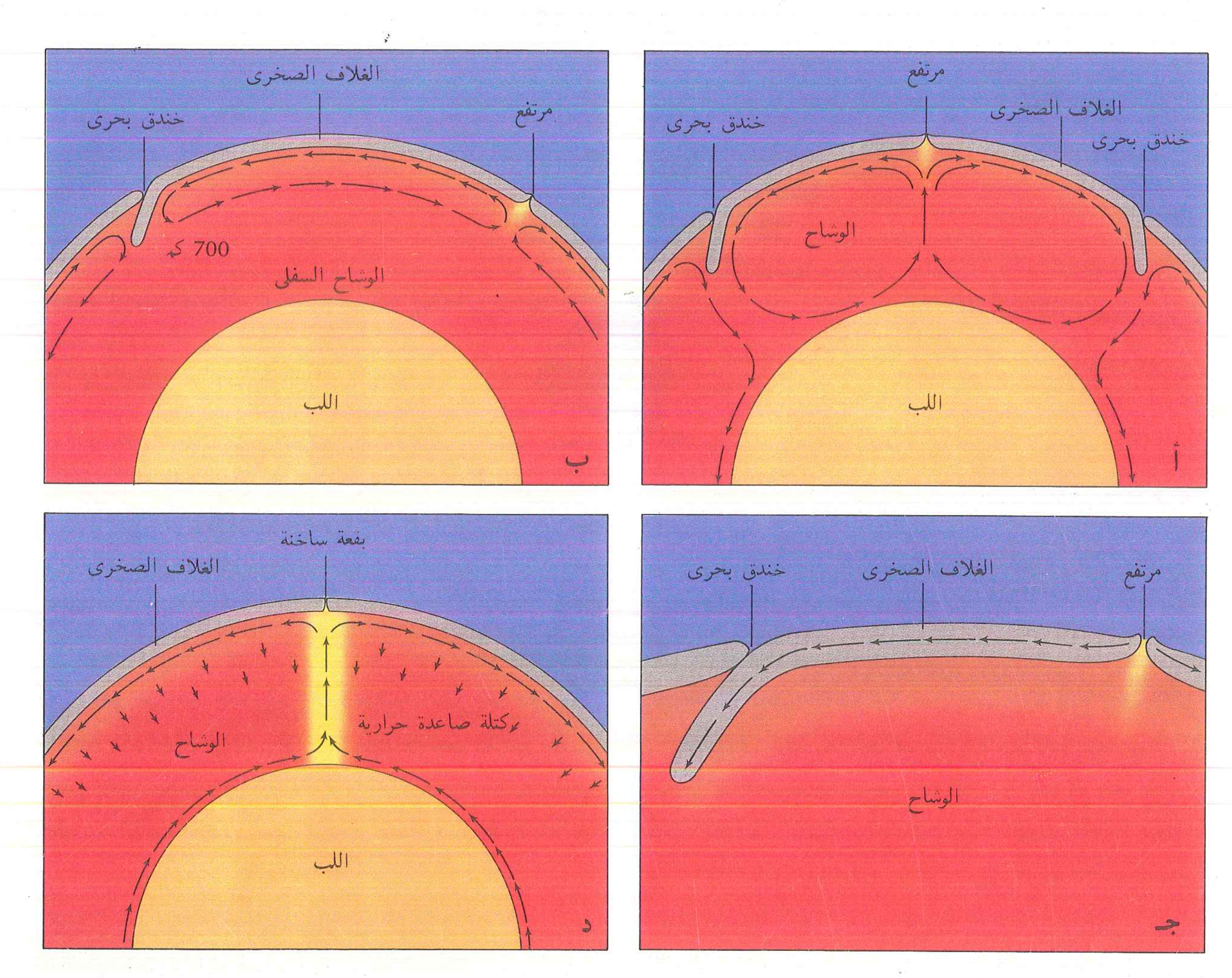
شكل 16 ـ 27
تعيين الاعمار باستعمال المواد المشعة لجزر هاواى يبين التناقص فى عمر النشاط البركانى تجاه هاواى.

لقد اقترح الباحثون بأن هناك بقعة ساخنة داخل الوشاح تقوم بقذف الصهير فوق قاع البحر الذى يعلوها. ويفترض بأن التراكيب البركانية تبرز على التوالى فى الوقت الذى يتحرك فيه اللوح الهادى فوق البقعة الساخنة. ولقد بينّ عمر كل من هذه البراكين الوقت الذى كان فيه فوق البقعة الساخنة الثابتة الموقع نسبيا. وتعتبر جزيرة كاواى أقدم الجزر الكبيرة فى سلسلة جزر هاواى. ولقد كانت كاواى الجزيرة الوحيدة هناك وقت تكوُّنها وذلك منذ خمسة ملايين سنة مضت (شكل 16 ـ 27). وهناك دليل حول عمر كاواى يمكن مشاهدته بتفحص البراكين الهامدة التى تمت تعريتها وتحولت الى قمم مثلمة وأودية فسيحة. وعلى العكس من ذلك فإننا نجد أن المنحدرات الجنوبية لجزيرة هاواى تتكوّن من طفوح اللابا الحديثة. بل إن إثنين من براكينها، المونا لوًا والكيلاوا، لا زالا نشطين حتى الآن. ولقد تبين حديثا بأن هناك ركام بركانى يتكوّن الآن على قاع المحيط بالقرب من شاطىء جزيرة هاواى. وعليه يمكن القول جيولوجيا بأن الوقت لن يطول حتى تبرز جزيرة جديدة لتنضم الى سلسلة تلك المنطقة الاستوائية من الجزر.

وبالرغم من أنه قد ثبت وجود البقع الساخنة إلا أنه لم تنجلى بوضوح حتى الآن طبيعتها الدقيقة ولا دورها فى حركية الألواح. فيبدو أن هذه البقع أماكن جدُّ ساخنة داخل أعماق وشاح الأرض. فالحرارة العالية والضغط المرتفع تعمل على الدفع الى أعلى بكميات من الصخور المنصهرة التى تسبب فى كثير من الأحيان إنفجار البراكين على السطح. وتدل المعلومات على أن معظم البقع الساخنة قابعة فى مكانها لا تتحرك غير أن بعضها يبدو أنه قد تحرك قليلا. وقد وجد أن حوالى 20 بقعة ساخنة من مجموع يتراوح بين 50 و 120 تقع بالقرب من حواف لألواح متباعدة بينما الباقى لا علاقة لها بحواف الألواح. ويعتقد بأن هناك بقعة ساخنة تحت أيسلندة مسئولة عن التراكمات الضخمة غير العادية من اللابا بذلك الجزء من مرتفع وسط المحيط الأطلسى، كما يعتقد بوجود بقعة ساخنة تحت منتزه البيلوستون بوسط أمريكا، وربما كانت مسئولة عن طفوح اللابا والرماد البركانى الذى يغطى تلك المنطقة، وإذا ما صح ذلك فلا يستبعد أن تعيد البراكين نشاطها هناك مرة أخرى. وتوجد بقع ساخنة أخرى تحت قيعان البحار نتج عنها عدد من المرتفعات البركانية لها نفس اتجاه حركة الألواح.

الميكانيكية المحركة

لقد تناولت النظرية أعلاه حركة الألواح الى جانب أثر هذه الحركة. أى أن القبول بها لا يعتمد على معرفة القوة أو القوى المحركة للألواح. وهذا من حسن الحظ حيث أنه والى حد الآن لم تفى أى من المقترحات المقدمة للميكانيكية المحركة بجميع جوانب حركة الألواح، غير أن التوزيع غير



شكل 16 ـ 28

نماذج اقترحت للقوة الدافعة لحركية الألواح. (أ) ـ خلايا لتيارات حمل ضخمة داخل الوشاح تحمل الغلاف الصخرى مثل حزام التحويل. (ب) ـ خلايا لتيارات حمل داخل الجزء الأعلى من الوشاح تعمل على تحريك الألواح. (جـ) ـ نماذج الشد والدفع وهى ايضا نوع من الحمل بحيث يعمل المسطح الغائر المنخفض فى حرارته الى شد قاع البحر من وراء بينما تدفع الجاذبية الجانب الآخر من على قمم مرتفعات وسط المحيط.(د) ـ نموذج الكتل الساخنة الذى يقول بأن حركة المواد الى اعلى اقتصر على نطاقات طبقة بينما يحدث الهبوط ببطء خلال كل اجزاء الوشاح.

المتساوى للحرارة داخل الكرة الأرضية قد قبل به معظم الباحثين على أنه السبب الرئيسى فى حركة الألواح. إذ يعتقد كثير من الجيولوجيين بأن إختلاف درجة الحرارة داخل الأرض قد نجمت عنه خلايا من تيارات الحمل الضخمة داخل الوشاح (شكل 16 ـ 28 أ،ب). فمكونات الوشاح السفلى الساخنة والقليلة الكثافة نسبة الى ما فوقها ترتفع بالتدريج عند مرتفعات وسط المحيطات. وعند إنبساط هذه المكونات جانبيا تبرد وتصبح اكثر كثافة لتبدأ فى الغوص من جديد نحو الوشاح وترتفع درجة حرارتها. لاحظ أنه ليس من الضرورى أن تنصهر الصخور لتنساب. وعليه يمكن

للصخور أن تنساب إذا ما تعرضت لدرجة حرارة وضغط مرتفعين وذلك لمدة طويلة. وقد دلّت القياسات على أن معدل الانسياب الحرارى أكبر عند مرتفعات وسط المحيط من باقى أرجائه، وهذا مؤشر جيد على إحتمالية وجود نوع من خلايا تيارات الحمل، غير أن الكثير من تفاصيل حركة هذه التيارات بقيت حتى الآن غير واضحة. فكم هناك خلية منها؟ تحت أى عمق تتكوّن؟ وما هو تركيبها؟

وبالرغم من أن التوزيع غير المتساوى للحرارة قد قُبل كقوة محركة للألواح، غير أن الشك لا يزال يخامرالكثير من الجيولوجيين فى إمكانية وجود خلايا تيارات حمل بهذا الحجم داخل الوشاح. وبناء عليه لا بد وأن عددا آخر من المقترحات قد قدم كبديل لميكانيكية حركة الألواح. وأحد هذه المقترحات يقول بأن المسطح المحيطى البارد ذو كثافة أكبر من النطاق الوهن الذى يدعمه. وبناء على هذه الحقيقة فإن اللوح أثناء هبوطه لا بد وأنه يعمل على جرِّ الغلاف الصخرى من ورائه. وهذا المقترح شبيه بنموذج آخر يقول بأن موقع مرتفعات وسط المحيط المرتفع قد يتسبب فى إنزلاق الغلاف الصخرى تحت تأثير الجاذبية (شكل 16 ـ 28 جـ). هذه النماذج من الدفع والشد فى حد ذاتها نوع من تيارات الحمل. فبدخول طرف اللوح الغائر الوشاح لا بد بأن تزاح مواد الوشاح جانبيا لتنتقل تجاه مرتفعات وسط المحيط. وتكتمل الخلية بحركة الصخور المنصهرة الى أعلى من النطاق الوهن ليملأ الفراغ عند الألواح المحيطية المنفرجة.

وتفتقر بعض المحيطات مثل الأطلسى الى نطاقات غور. وعليه فإن ميكانيكية شد المسطّح لا تفسر الانفراج عند مرتفعاتها. وعلى إعتبار أن بعض مرتفعات وسط المحيط الأخرى غير شاهقة الارتفاع فإن ذلك يضعف من فاعلية النموذج البديل وهو دفع المسطح. ولكن ربما تكون ظاهرة شد المسطح ودفعه ذات تأثير فى بعض تركيبات مرتفعات وسط المحيط بل قد يعملان مجتمعين كقوة دفع لحركة بعض الألواح.

وهناك نموذج آخر لتيارات الحمل الحرارية يقول بأن الكتل الساخنة (البقع الساخنة) الضيقة المجال نسبيا هى التى تعمل على حركة الألواح (شكل 16 ـ 28 د). ويعتقد بأن هذه الكتل الساخنة تبدأ فى التكوّن قرب الحد الفاصل بين لب الأرض ووشاحها. وبوصول هذه الكتل الغلاف الصخرى تنتشر جانبيا وتحمل معها الألواح بعيدا عن نطاق خروجها. وعادة ما تكشف هذه الكتل الساخنة عن نفسها على هيئة تراكيب بركانية تنمو فوق قاع المحيط فى بعض الأماكن مثل أيسلندة. وقد تمّ التعرف على حوالى 20 بقعة ساخنة على طول مرتفعات وسط المحيطات حيث يمكنها المشاركة فى حركة ابتعاد الألواح. تذكّر أن بعض الكتل الساخنة مثل التى كوّنت جزر هاواى لا تقع على مرتفع وسط المحيط، وعليه لا بد لنا أن نخلص الى أن لهذا النموذج محاذيره. وربما كان لكل هذه الظواهر مجتمعة دور فى حركة الألواح.

أسئلة للمراجعة :

1 ـ ما هو الذى جعل العلماء مثل الفرد واغنر فى البداية يعتقدون بأن القارات كانت فى يوم ما متصلة ببعضها؟

2 ـ ما هى البنجيا؟

3 ـ عدد الدلائل التى جمعها واغنر وزملاؤه لدعم فرضية إنجراف القارات.

4 ـ ما هو الاعتقاد الذى كان سائدا فى أوائل هذا القرن حول كيفية وصول بعض الحيوانات الى قارات أخرى عبر المحيطات؟

5 ـ إشرح باختصار كيف أن القبول حديثا بنظرية حركية الألواح قد وصف بأنه ثورة علمية.

6 ـ كيف يمكن أن يستعمل التجلد بنصف الكرة الجنوبى أثناء أواخر دهر الحياة القديمة فى دعم فرضية الانجراف القارى؟

7 ـ إشرح كيف يمكن للمغناطيسية القديمة أن تستعمل لتحديد موقع مكان ما بالنسبة الى خط الاستواء فى زمن من الأزمنة السابقة.

8 ـ ما المقصود بانفراج قاع البحر؟ لمن يرجع الفضل فى وضع أسس فكرة انفراج قاع البحر؟

9 ـ إشرح كيف ربط فرد فاين و د. ماثيوس بين إنفراج قاع البحر ومعكوس المغناطيسية؟

10 ـ ما هى الأسس التى اعتمد عليها لتحديد حدود الألواح فى البداية ؟

11 ـ أين يتكون الغلاف الصخرى الجديد؟ أين يستهلك؟ لماذا يستلزم تكوّن الغلاف الصخرى واستهلاكه فى آن واحد؟

12 ـ لماذا يغور الجزء المحيطى من لوح الغلاف الصخرى للأرض بينما لا يحدث ذلك للجزء القارى؟

13 ـ ما مدى امكانية إعتبار الجزر اليابانية مماثلة لتكوّن جبال الأنديز؟ وما الفرق بينهما؟

14 ـ ميّز بين فوالق التحويل وبين النوعين الآخرين من حواف الألواح.

15 ـ يتنبأ البعض بأن كاليفورنيا ستغوص فى البحر. هل تنسجم هذه الفكرة ونظرية حركية الألواح؟

16 ـ إذا ما صحت فكرة البقع الساخنة ففى أى اتجاه يتحرك اللوح الهادى عندما

تكونت قمم الأمبراطور البركانية المعزولة؟ (أنظر شكل 16—26)، وعندما تكوّنت قمم هاواى البركانية المعزولة؟

17 ـ ما هو نوع حواف الألواح ذات العلاقة بالأماكن أو الظواهر الآتية (حدد بدقة قدر المستطاع):

الهيمالايا، جزر الألوش، البحر الأحمر، جبال الأنديز، فالق سان أندرياس، أيسلنده، اليابان، قمة سانت هيلنز.

الكلمات الدالة :

الحواف المتباعدة	**divergent boundary**
الحواف المتقاربة	**convergent boundary**
المغناطيسية القديمة	**paleomagnetism**
انجراف القارات	**continental drift**
انفراج قاع البحر	**sea floor spreading**
بقعة ساخنة	**hot spot**
تجول القطبين	**polar wandering**
أطراف فالق التحويل	**transform fault boundary**
صدع أو وادى صدعى	**rift or rift valley**
لوح	**plate**
معكوس القطبية	**reverse polarity**
قطبية عادية	**normal polarity**
قوس بركانى	**volcanic arc**
قوس جزيرى	**island arc**
مغناتومتر ـ جهاز قياس المغناطيسية	**magnatometer**
نطاق الغوص	**subduction zone**
نقطة كورى	**Curie point**